

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Hodnocení kvality povrchu po  
dokončování technologií elektroerozivního  
drátového řezání a frézování z polotovaru  
po 3D tisku**

Evaluation of Surface Quality after  
Finishing of EDM Technology and Milling  
with the use Semi-finished Product after 3D  
Printing

Student: Bc. Lukáš Sláma

Osobní číslo: SLA0221

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Sláma**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: **Hodnocení kvality povrchu po dokončování technologií elektroerozivního drátového řezání a frézování z polotovaru po 3D tisku**  
**Evaluation of Surface Quality after Finishing of EDM Technology and Milling with the use Semi-finished Product after 3D Printing**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor vybraných parametrů drsnosti a vlnitosti povrchu po 3D tisku.
2. Teoretický rozbor vybraných parametrů drsnosti a vlnitosti povrchu po technologiích frézování a technologiích elektroerozivním drátovým řezání.
3. Měření a analýza vybraných parametrů drsnosti vzorků.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

SADÍLEK, M., FOJTÍK, F., SADÍLKOVÁ, Z., KOLAŘÍK, K., PETRŮ, J. A Study of Effects of Changing the Position of the Tool Axis to the Machined Surface. *Transaction of FAMENA*. Vol. 39, No. 2, Zagreb 2015, pp.33-46. ISSN:1333-1124.  
SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění I – Elektroerozivní, elektrochemické a chemické obrábění*. VŠB – TU Ostrava, 2016, 104 s., ISBN 978-80-248-3943-1.  
HAMOUZ, L. *Softwarová optimalizace obrábění složitých tvarových ploch při práci na čisto s ohledem na ochranu nástroje*. Plzeň, 2003. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.  
LEACH, R. *Characterisation of Areal Surface Texture*. DOI: 10.1007/978-3-642-36458-7\_1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, p. 353.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

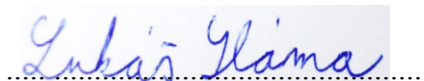


  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.

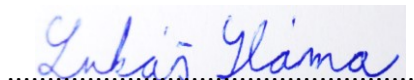


Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou\*) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou\*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, же podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská\*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.



Podpis studenta

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SLÁMA, L. *Hodnocení kvality povrchu po dokončování technologií elektroerozivního drátového řezání a frézování z polotovaru po 3D tisku: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 79 s. Vedoucí práce: Sadílek, M.

Tato diplomová práce se zabývá analýzou a posouzením vlivu čtyř rozdílných vnitřních struktur na kvalitu povrchu součástí zhotovených aditivní technologií především po obrábění, ale také po samotném 3D tisku a následném tepelném zpracování. V první části práce je proveden teoretický rozbor kvality povrchu po 3D tisku metodou SLM, frézování a drátovém řezání metodou WEDM. Ve druhé části je proveden popis součástí (vzorků) sloužících k měření drsnosti včetně celého postupu jejich výroby, tepelného zpracování a obrábění. V této části je dále proveden výběr a charakteristika sledovaných parametrů, podle kterých jsou vzorky s rozdílnými strukturami porovnávány.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

SLÁMA, L. *Evaluation of Surface Quality after Finishing of EDM Technology and Milling with the use Semi-finished Product after 3D Printing: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 79 p. Thesis head: Sadílek, M.

This master thesis deals with analysis and assesement of the influence of four different internal structures on the surface quality of components made by additive technology, mainly after machining, but also after the 3D printing and subsequent heat treatment. First part of thesis is focused on theoretical analysis of surface quality after 3D printing by SLM method, milling and wire cutting by WEDM method. In the second part of thesis are made descriptions of components (samples) used to measure surface roughness, including the entire process of production, heat treatment and machining. The selection and characteristics of the monitored parameters are performed in this part of thesis as well. According to this are samples then compared by their different structures.

# Obsah

Obsah.....	6
Seznam použitých značek a symbolů.....	9
Úvod.....	11
1 Teoretický rozbor vybraných parametrů drsnosti a vlnitosti povrchu po 3D tisku...	12
1.1 Popis aditivní výroby metodou SLM.....	12
1.2 Kvalita povrchu součásti po 3D tisku.....	13
2 Teoretický rozbor vybraných parametrů drsnosti a vlnitosti povrchu po technologiích frézování a technologiích elektroerozivním drátovém řezání.....	16
2.1 Rozbor kvality povrchu při frézování.....	16
2.2 Rozbor kvality povrchu po elektroerozivním drátovém řezání.....	18
3 Popis experimentu.....	19
3.1 Základní popis vzorku.....	21
3.1.1 Typy vzorků a jejich struktury.....	21
3.1.2 Charakteristika materiálu vzorků.....	22
3.2 3D tisk vzorků.....	24
3.3 Tepelné zpracování vzorků.....	25
3.3.1 Výběr vzorků.....	26
3.3.2 Provedení tepelných zpracování.....	27
3.4 Výběr vzorků pro obrábění.....	27
3.5 Obrábění vzorků.....	28
3.5.1 Obrábění vzorků metodou WEDM.....	29
3.5.2 Obrábění vzorků frézováním.....	31
4 Měření a analýza vybraných parametrů drsnosti vzorků.....	36
4.1 Skenování povrchu vzorků.....	36
4.1.1 Charakteristika optického 3D mikroskopu Alicona infinitefocus G5.....	36
4.1.2 Zásady pro skenování obroběných částí bočních ploch.....	37

4.1.3	Zásady skenování neobrobených částí bočních ploch.....	37
4.1.4	Postup skenování .....	38
4.2	Výběr sledovaných parametrů .....	38
4.2.1	Profilová charakteristika povrchu.....	38
4.2.2	Plošná charakteristika povrchu .....	41
4.3	Vyhodnocování provedených snímků .....	42
4.4	Zpracování získaných hodnot po frézování a WEDM.....	43
4.4.1	Vzorový výpočet .....	43
4.5	Analýza kvality povrchu po WEDM .....	45
4.5.1	Porovnání drsnosti dle parametru RSm .....	46
4.5.2	Porovnání drsnosti dle parametru Ra .....	47
4.5.3	Porovnání drsnosti dle parametru Rz .....	48
4.5.4	Porovnání vlnitosti dle parametru Wz.....	49
4.5.5	Porovnání drsnosti dle parametru Sz .....	50
4.5.6	Porovnání drsnosti dle parametru Vvv .....	51
4.5.7	Porovnání drsnosti dle parametru Vvc .....	52
4.5.8	Porovnání drsnosti dle parametru Vmp .....	53
4.6	Analýza kvality povrchu po frézování.....	54
4.6.1	Porovnání drsnosti dle parametru RSm .....	54
4.6.2	Porovnání drsnosti dle parametru Ra .....	55
4.6.3	Porovnání drsnosti dle parametru Rz .....	56
4.6.4	Porovnání vlnitosti dle parametru Wz.....	57
4.6.5	Porovnání drsnosti dle parametru Sz .....	58
4.6.6	Porovnání drsnosti dle parametru Vvv .....	59
4.6.7	Porovnání drsnosti dle parametru Vvc .....	60
4.6.8	Porovnání drsnosti dle parametru Vmp .....	61
4.7	Porovnání rozdílu mezi levou a pravou stranou vzorku .....	61
4.7.1	Porovnání drsnosti dle parametru RSm .....	62

4.7.2	Porovnání drsnosti dle parametru Ra .....	63
4.7.3	Porovnání drsnosti dle parametru Rz .....	64
4.7.4	Porovnání vlnitosti dle parametru Wz .....	65
4.7.5	Porovnání drsnosti dle parametru Sz .....	66
4.7.6	Porovnání drsnosti dle parametru Vvv .....	67
4.7.7	Porovnání drsnosti dle parametru Vvc .....	68
4.7.8	Porovnání drsnosti dle parametru Vmp .....	69
5	Závěry pro realizaci v praxi. ....	70
	Závěr.....	71
	Poděkování.....	73
	Seznam použité literatury.....	74
	Seznam příloh.....	79



## Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Popis	Jednotka
2D	dvourozměrný	[-]
3D	trojrozměrný	[-]
A	tažnost	[%]
$a_p$	hloubka řezu	[mm]
D	průměr nástroje (frézy)	[mm]
E	modul pružnosti	[GPa]
$f_z$	posuv na zub	[mm]
h	tloušťka vrstvy	[ $\mu\text{m}$ ]
HV	stupeň tvrdosti dle Vickerse	[-]
k	součinitel nejistot	[-]
$k_s$	opravný koeficient počtu hodnot	[-]
$k_u$	koeficient rozšíření	[-]
n	počet naměřených hodnot	[-]
NC	číslicové ovládání strojů	[-]
P	výkon laseru	[W]
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_e$	mez kluzu	[MPa]
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_p$	největší výška výstupku profilu drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_{Sm}$	průměrná šířka prvků profilu drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_v$	největší hloubka prohlubně profilu drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	největší výška profilu drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
SLM	selektivní laserové tavení	[-]
SNOP	stroj, nástroj obrobek, přípravek	[-]
Sz	maximální výška omezené stupnice povrchu	[ $\mu\text{m}$ ]
$s(\bar{x})$	výběrová směrodatná odchylka	[ $\mu\text{m}$ ]

TZ	tepelné zpracování	[-]
U	rozšířená nejistota měření	[ $\mu\text{m}$ ]
$u_A$	standartní nejistota typu A	[ $\mu\text{m}$ ]
$u_B$	standartní nejistota typu B	[ $\mu\text{m}$ ]
$u_{B1}$	nejistota ustavení vzorku na podložce	[ $\mu\text{m}$ ]
$u_{B2}$	nejistota měřicího přístroje	[ $\mu\text{m}$ ]
$u_C$	kombinovaná nejistota měření	[ $\mu\text{m}$ ]
$u_{z1}$	vliv ustavení vzorku na podložce	[%]
$u_{z2}$	vliv nedokonalosti měřicího přístroje	[%]
$v$	rychlost skenování	[mm/s]
$v_c$	řezná rychlost	[m/min]
$V_{mp}$	pik objemu materiálu omezené stupnicí povrchu	[ml/m <sup>2</sup> ]
$V_{vc}$	neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu	[ml/m <sup>2</sup> ]
$V_{vv}$	neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu	[ml/m <sup>2</sup> ]
WEDM	elektroerozivní drátové řezání	[-]
$W_z$	největší výška profilu vlnitosti	[ $\mu\text{m}$ ]
$x$	přesazení stavebních vrstev při sklonu 45 °	[ $\mu\text{m}$ ]
$x_i$	jednotlivá naměřená hodnota	[ $\mu\text{m}$ ]
$X_s$	šířka prvku profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$\bar{x}$	výběrový průměr	[ $\mu\text{m}$ ]
$y$	přesazení stavebních vrstev sklonu 65 °	[ $\mu\text{m}$ ]
$z$	počet zubů nástroje (frézy)	[-]

## Úvod

V průběhu posledních let prošla technologie 3D tisku společně s 3D tiskárnami velmi rychlým vývojem a zdokonalováním. V současné době je již 3D tisk na poměrně vysoké úrovni. Vzhledem k rychlosti vývoje a stále rostoucímu počtu 3D tiskáren lze předpokládat, že do budoucna se stane aditivní technologie běžnou součástí sériové výroby tvarově složitých součástí nejen ve strojírenství.<sup>2, 12</sup>

Velkou výhodou 3D tisku je možnost výroby součástí, které jsou běžnými i nekonvenčními technologiemi nevyrobitelné, nebo vyrobitelné velmi špatně s velkou mírou odpadního materiálu. Jedním z problémů součástí vyráběných aditivní technologií je kvalita jejich povrchu. Povrch součástí zhotovených touto technologií je totiž poměrně členitý a hrubý. V případě součástí s předepsanou kvalitou funkčních ploch zmíněná nekvalita povrchu znemožňuje použití těchto součástí bez předchozí úpravy, nebo opracování funkčních ploch.<sup>2, 12</sup>

Kvalita povrchu je zpravidla charakterizována drsností, nebo vlnitostí povrchu a jde o velmi významnou vlastnost. Na kvalitě povrchu totiž závisí provozní vlastnosti (únavová pevnost, odolnost proti opotřebení), spolehlivost a životnost zejména dynamicky namáhaných součástí.<sup>13</sup>

Cílem této práce je provést analýzu a vyhodnocení kvality povrchu vzorků zhotovených aditivní technologií SLM po obrábění frézováním a metodou WEDM. Dále na základě této analýzy zjistit míru vlivu vnitřní struktury vzorku na kvalitu obrobeného povrchu. Dalším cílem je také zjistit rozdíl v kvalitách povrchu mezi levou a pravou stranou vzorků po 3D tisku a dvou rozdílných tepelných zpracováních.

# 1 Teoretický rozbor vybraných parametrů drsnosti a vlnitosti povrchu po 3D tisku

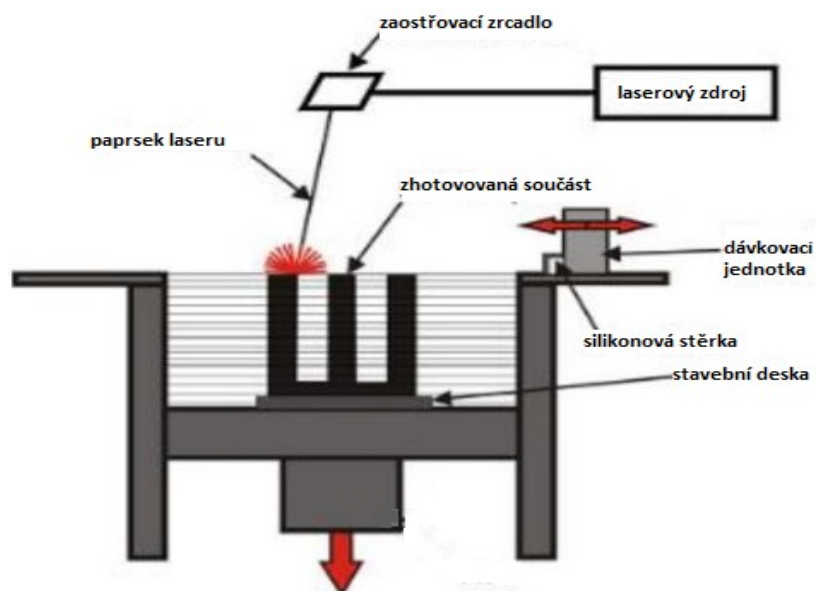
Před samotným rozбором povrchu po 3D tisku, je nejprve vhodné nastínit princip samotné metody, kterou je 3D tisk součástí prováděn. Jelikož je stanoveno, že vzorky potřebné k analýze budou vyráběny metodou SLM, bude tato metoda v následující podkapitole popsána.

## 1.1 Popis aditivní výroby metodou SLM

Výroba součástí pomocí 3D tisku metodou SLM je založena na tavení vstupního materiálu ve formě prášku. Tento prášek bývá zpravidla kovový, ale používají se i prášky z kompozitních materiálů. Roztavené částice prášku se navzájem spojí a po ztuhnutí vytvoří celkový objem vyráběné součásti. K tavení prášku je využito intenzity paprsku vysoce výkonného laseru. Průměr tohoto paprsku je zhruba 70  $\mu\text{m}$  a dokáže tak na malou plochu koncentrovat velké množství energie. Laserový paprsek je polohovatelný a jeho pohyb je řízen na základě vygenerovaného NC programu. Aby nedocházelo k oxidaci musí 3D tisk probíhat bez přítomnosti vzduchu, zejména kyslíku. Z tohoto důvodu je 3D tiskárna vybavena vakuovou procesní komorou, do které je navíc přiváděn inertní ochranný plyn. Jako ochranný plyn bývá nejčastěji používán Argon, který je těžší než vzduch. Díky této vlastnosti vytlačí argon zbylý vzduch do horní části komory a vytvoří tak dokonalou ochrannou atmosféru v prostoru, kde bude probíhat tisk. Procesní komora se dělí na dvě části, a to na procesní a dávkovací část. <sup>1,2,3</sup>

Zhotovení součástí aditivní technologií se nazývá stavební proces. Při tomto procesu je celý objem součásti postupně zhotoven z vrstev o tloušťce 20 – 100  $\mu\text{m}$ , které se na sebe přitavují. Celý stavební proces probíhá ve stavební části procesní komory. Do této komory se jako první vloží odmagnetovaná stavební deska, která se následně ustaví a zkalibruje. Dále se z procesní komory odsaje vzduch a následně se celá komora zaplní ochranným plynem. <sup>1,2</sup>

V tento okamžik začíná stavba součásti, kdy je na stavební desku z dávkovací jednotky přivedena patřičná dávka prášku. Prášek je po celé stavební desce rozhrnut v rovnoměrné vrstvě pomocí silikonové lišty. V takto upravené vrstvě prášku se nyní pomocí laserového paprsku ztaví patřičný objem prášku v místě zhotovované součásti. Pro vytvoření následující vrstvy se stavební deska posune o tloušťku následující vrstvy dolů. Celý postup stavby se od nanesení prášku až po posunutí stavební desky opakuje až do zhotovení poslední vrstvy součásti. Schématické průběh celého procesu je patrný z obrázku 1.1. <sup>1,2</sup>



Obrázek 1.1 - Stavební proces metodou SLM<sup>7</sup>

## 1.2 Kvalita povrchu součásti po 3D tisku

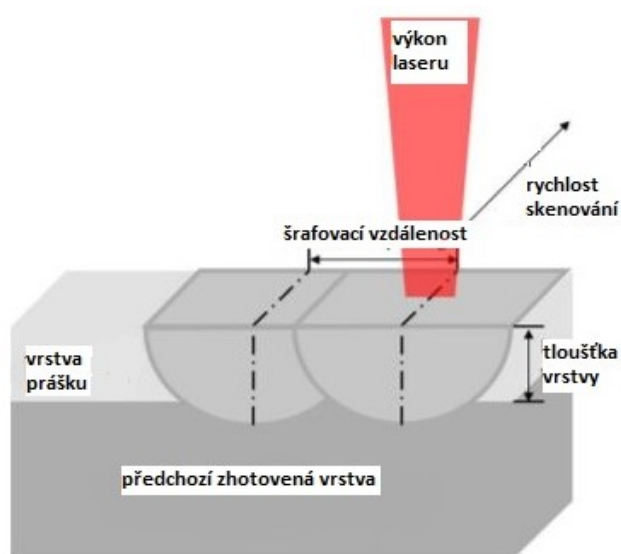
Z principu metody SLM, je zřejmé že kvalita povrchu vyráběné součásti bude záviset na opakovatelné přesnosti polohy laserového paprsku, tloušťce jednotlivých vrstev a výkonu laseru.<sup>1,2,3</sup>

Kromě výše zmíněných vlivů je dále kvalita povrchu závislá na těchto faktorech:

- materiálové vlastnosti prášku,
- velikost částic prášku,
- čistota prášku,
- rychlost skenování,
- strategie skenování,
- šrafovací vzdálenost,
- sklon zhotovované součásti,
- poloha zhotovované součásti.<sup>3</sup>

Výkon laseru, tloušťka vrstvy, rychlost skenování a šrafovací vzdálenost patří mezi významné procesní parametry 3D tisku patrné z obrázku 1.2. Velikosti těchto parametrů určují tzv. objemovou hustotu energie laseru. Objemová hustota energie laseru je pro kvalitu povrchu velmi důležitá, jelikož zcela ovlivňuje míru roztavení částic prášku. Procesní

parametry 3D tisku musí být vhodně nastaveny, aby tato energie byla optimální a docházelo tak k tvorbě ideálně protavených homogenních vrstev.<sup>9</sup>

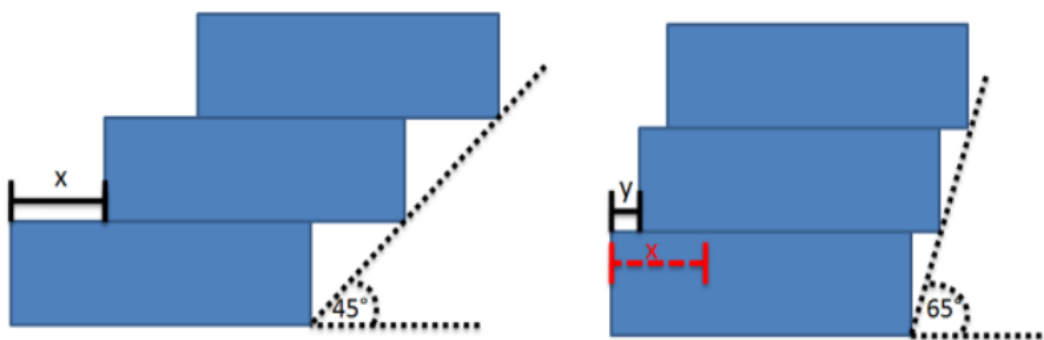


Obrázek 1.2- Znáornění procesních parametrů metody SLM<sup>20</sup>

Součásti zhotovené metodou SLM se vyznačují rozdílnou kvalitou povrchu jednotlivých ploch. Z tohoto důvodu je nutné zvolit vhodnou polohu součásti v procesní komoře. Největší rozdíly kvality povrchu se v praxi projevují mezi vodorovnými a svislými plochami. Běžně dosahovaná drsnost povrchu součástí zhotovených metodou SLM se pohybuje v rozmezí hodnot parametru  $R_a$  10 – 12  $\mu\text{m}$ , ale může být i vyšší. Dle výzkumů kvalitu povrchu zhotovovaných součástí nejvíce ovlivňuje tloušťka vrstvy prášku. S rostoucí vrstvou totiž dochází k většímu přichycování částic z okolního prášku k bočním stěnám. Kromě toho silnější vrstva prášku také zapříčiňuje výraznější vznik schodišťového efektu. Schodišťový efekt společně s balling efektem jsou jedny z hlavních jevů, které nepříznivě ovlivňují kvalitu povrchu aditivně vyráběných součástí.<sup>3</sup>

### Schodišťový efekt

K tomuto efektu nejčastěji dochází při zhotovování součástí skloněných vůči stavební desce. Schodišťový efekt je ve své podstatě přesazení jednotlivých vrstev přes sebe ve směru sklonu zhotovované součásti. Čím je zhotovovaná součást více skloněná vůči stavební desce, tím je míra přesazení jednotlivých vrstev větší a tím pádem je horší i kvalita povrchu. Názornou ukázkou schodišťového efektu je možné vidět na obrázku 1.3, který porovnává míru přesazení x a y jednotlivých vrstev při úhlech sklonu zhotovované součásti 45° a 65°. Součásti zhotovované se sklonem menším než 45° vyžadují tvorbu podpurné struktury pro skloněnou stěnu a tedy bezpodmínečně i následné obrábění.<sup>3</sup>



Obrázek 1.3 - Schodišťový efekt <sup>23</sup>

### Balling efekt

Jedná se o fyzikálně metalurgický jev, který je charakterizován vznikem částic kulovitého tvaru na povrchu jednotlivých vrstev. Tyto kulové částice vznikají z roztaveného prášku z důvodu vysokého povrchového napětí již zhotovené předchozí vrstvy. Vysoké povrchové napětí vrstvy totiž může způsobit, že se roztavený prášek s touto vrstvou nedokáže dokonale spojit a tavenina se místo dokonalého slití shlukuje do kulovitých částic. V případě poslední vrstvy má balling efekt výrazný vliv na kvalitu povrchu, jestliže ovšem tento jev vzniká i v předešlých vrstvách dochází ke snižování soudržnosti jednotlivých vrstev a vzniku pórů. Povrch součásti ovlivněný tímto jevem je možné vidět na obrázku 1.4.

8



Obrázek 1.4 - Balling efekt

Příčinou balling efektu je nejčastěji nedostatečná čistota práškového materiálu nebo nevhodně zvolené procesní parametry 3D tisku. Nedostatečnou čistotou se rozumí přítomnost vzdušné vlhkosti, adsorbovaných plynů, vrstev oxidů a nitridů na částicích prášku. <sup>8</sup>

## 2 Teoretický rozbor vybraných parametrů drsnosti a vlnitosti povrchu po technologiích frézování a technologiích elektroerozivním drátovém řezání.

### 2.1 Rozbor kvality povrchu při frézování

Při frézování dochází k odřezávání materiálu v podobě třísek vícebřítým rotačním nástrojem. Břity tohoto nástroje při obrábění překonávají řezný odpor obráběného materiálu a zanechávají po sobě na již obrobeném povrchu stopy. Právě velikost a míra těchto stop ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu drsnost a vlnitost povrchu.<sup>10</sup>

Pro válcové frézování je možné stanovit profilovou drsnost obrobeného povrchu teoretickým výpočtem. Konkrétně se jedná o výpočet parametru  $R_z$ , který charakterizuje největší výšku profilu. Výpočet tohoto parametru vychází z následujícího empirického vztahu.<sup>11</sup>

$$R_z = \frac{f_z^2}{8 \cdot \left( \frac{D}{2} + \frac{f_z \cdot z}{\pi} \right)} \quad (1)$$

Tento teoretický vztah vychází ze skutečnosti, že drsnost povrchu je ovlivněna velikostí posuvu na zub  $f_z$ , průměrem nástroje  $D$  a počtem zubů frézy  $z$ . Obecně platí, že k dosažení nižší drsnosti povrchu je vhodné používat frézy o větších průměrech a s vyšším počtem zubů. Kromě toho je pro lepší drsnost povrchu vhodné volit nižší hodnoty posuvu na zub.<sup>11</sup>

V praxi má ale na výslednou kvalitu povrchu po válcovém frézování vliv daleko více faktorů, mezi které například patří:

- **Způsob frézování**

Způsobem frézování se v tomto případě rozumí frézování sousledné a nesousledné. Sousledné frézování se vyznačuje kvalitnějším povrchem obrobené plochy oproti frézování nesouslednému za předpokladu bezvadného stavu pohybových mechanismů stroje.<sup>10</sup>



- **Řezné podmínky**

Jedná se o parametry jako je řezná rychlost, hloubka řezu a již zmíněný posuv na zub. Aby bylo dosaženo co nejlepší kvality obráběných povrchů musí být tyto parametry vhodně zvoleny. Volba těchto parametrů závisí na obráběném materiálu a materiálu nástroje. Nevhodně zvolené řezné podmínky mohou způsobit nejen zhoršení kvality povrchu, ale také nadměrnou teplotu při řezání, která může zapříčinit vznik nárůstku, nebo úplné poškození řezného nástroje.<sup>10</sup>

- **Řezná geometrie a materiál nástroje**

Kvalita obrobeného povrchu závisí také na podmínkách, za jakých se se utváří tříska. Tyto podmínky nejvíce ovlivňuje řezná geometrie. Nástroj s vhodnou řeznou geometrií se volí na základě obráběného materiálu. Obecně platí, že k obrábění měkkých materiálů se volí nástroje s vyšším úhlem čela ( $8^\circ$ ) a nižším úhlem hřbetu ( $16^\circ$ ). Pro obrábění tvrdých materiálů se volí nástroje s nižším úhlem čela ( $0^\circ$ ) a vyšším úhlem hřbetu ( $20^\circ$ ). Druh použitého materiálu určuje odolnost břitů nástroje vůči opotřebení. Se zvětšující se mírou opotřebení nástroje může docházet v případě obrábění součástí z velmi měkkého materiálu i k vytrhávání materiálu z obráběné součásti.<sup>10</sup>

- **Materiál obráběné součásti**

Druh obráběného materiálu ovlivňuje kvalitu povrchu zejména svým chemickým složením a mechanickými vlastnostmi, které určují obrobitelnost daného materiálu.<sup>10</sup>

- **Tuhost stroje, nástroje, obrobku, přípravku.**

Tuhost celé soustavy SNOP má snad největší vliv na kvalitu povrchu obráběné součásti. Nedostatečná tuhost jednotlivých celků soustavy má za následek jejich rozkmitání. Vlivem tohoto rozkmitání vznikají vibrace, které negativně ovlivňují kvalitu povrchu v podobě zvýšené drsnosti a vlnitosti.<sup>10</sup>

Technologií válcového frézování lze běžně dosáhnout povrchu s drsností od  $Ra\ 3,2\ \mu m$ . Ve vyjimečných případech lze dosáhnout i drsnosti  $Ra\ 1,6\ \mu m$ .<sup>15</sup>

## 2.2 Rozbor kvality povrchu po elektroerozivním drátovém řezání

Elektroerozivní řezání je nekonvenční metodou obrábění, která je založena na principu elektrické eroze. To znamená, že úběr materiálu je realizován pomocí elektrických výbojů mezi elektrodou a obrobkem, které na obráběný materiál působí tepelnými a tlakovými účinky. Celý proces probíhá v dielektriku, ve kterém je obráběná součást buď ponořena, nebo je dielektrikum přiváděno přímo do místa řezu pomocí trysky. Elektrodu (nástroj) pro řezání představuje drát o průměru 0,02 – 0,35 mm postupně odvíjený z cívky. Drát se při řezání nedotýká obrobku, takže nedochází ke vzniku řezných sil a stop po nástroji na povrchu součásti, mezera mezi drátem a obrobkem se pohybuje v rozmezí 0,02 – 0,05 mm.<sup>14</sup>

Po každém výboji vznikají na povrchu součásti za poměrně vysokých teplot malé krátery, které ovlivňují výsledný povrch součásti. Velikost a tvar těchto kráterů je pro výslednou drsnost povrchu rozhodující a je ovlivněna těmito následujícími faktory.<sup>14,16</sup>

- **Energie výboje**

Energie výboje je ovlivněna velikostí proudu a napětím zdroje, od kterých se současně odvíjí i velikost mezery mezi elektrodou a obrobkem. Z těchto parametrů má na kvalitu povrchu největší vliv velikost proudu. Se zvětšující velikostí proudu dochází k vyššímu úběru materiálu, což má za následek vznik hlubších kráterů a tím i povrchu s vyšší drsností.<sup>14, 16</sup>

- **Doba impulzu**

Doba impulzu představuje čas mezi zapojením a vypojením generátoru a její prodloužování způsobuje vyšší úběr, ale zároveň i horší drsnost obrobeného povrchu.<sup>14</sup>

- **Druh a čistota dielektrika**

Dielektrikem se rozumí kapalina o vysokém elektrickém odporu. Nejčastěji se jako dielektrikum používá deionizovaná voda, strojní oleje a mnoho dalších. Mezi vlastnosti dielektrika, které ovlivňují výslednou drsnost povrchu patří izolační a chladicí schopnost. Tyto vlastnosti závisí nejen na druhu dielektrika, ale také na jeho znečištění částicemi již odebraného materiálu.<sup>16</sup>

Metodou WEDM lze dosáhnout povrchu o drsností Ra 0,08 - 1,27  $\mu\text{m}$ . Pro dosažení co možná nejmenší drsnosti povrchu je vhodné využívat nízkého proudu, krátkých impulzů.<sup>14</sup>

### 3 Popis experimentu

K určení kvality povrchu bylo vybráno sledování parametrů drsnosti a vlnitosti na zkušebních vzorcích. Dále bylo stanoveno, že parametry charakterizující kvalitu povrchu budou sledovány nejen na obrobených plochách tepelně nezpracovaných vzorků, ale také na neobrobených plochách tepelně zpracovaných vzorků. V případě neobrobených ploch budou získané parametry sloužit k orientačnímu porovnání kvality levé a pravé strany vzorku.

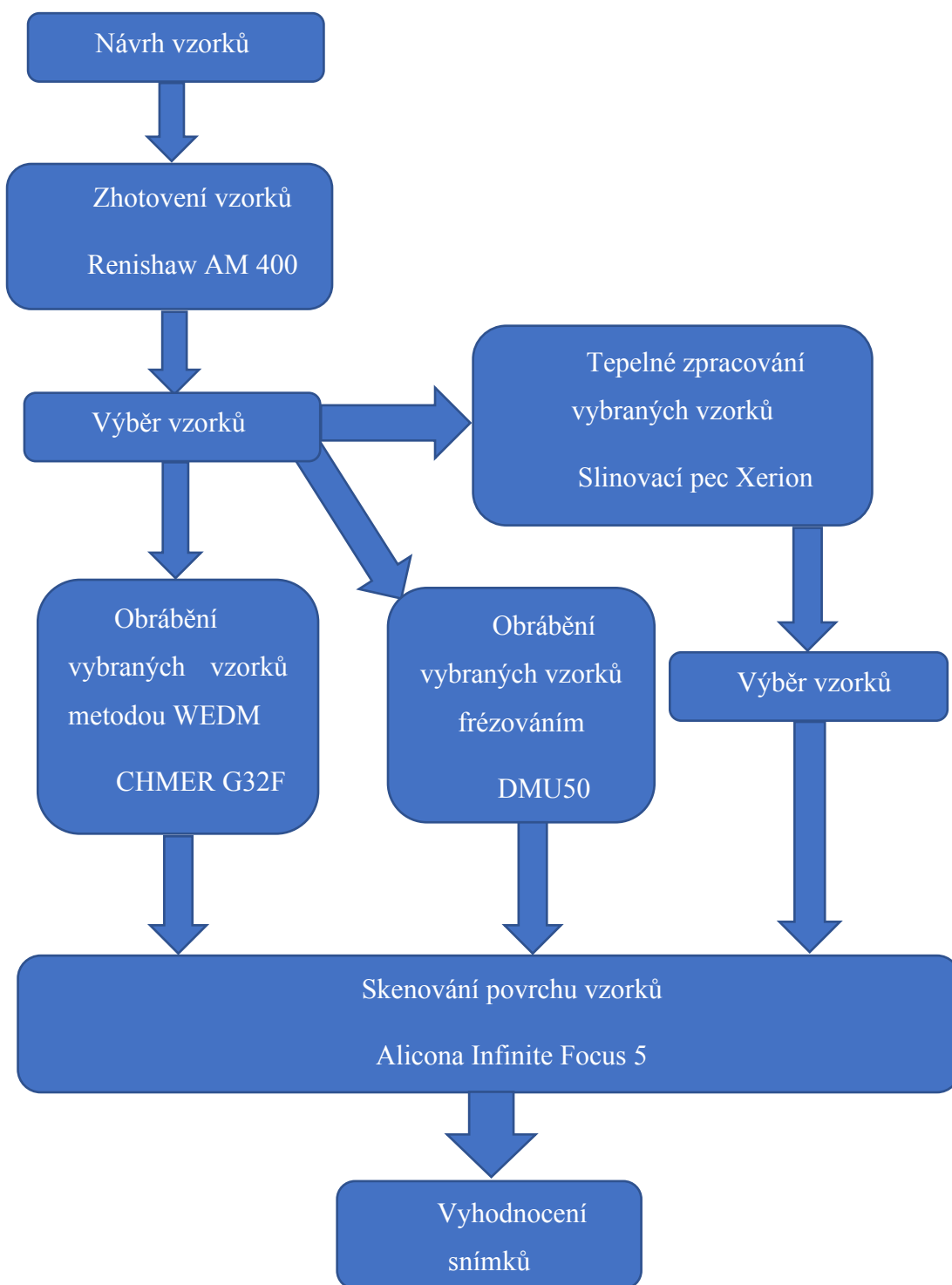
Před samotným měřením bylo nejprve nutné navrhnout a vyrobit vhodné vzorky s různými druhy vnitřních struktur. Po zhotovení potřebného počtu vzorků, byly z těchto vzorků vybrány tři soubory. Jeden z těchto souborů byl určen k obrábění a zbývajících dva soubory byly předány k tepelnému zpracování. K výrobě navržených vzorků byla zvolena metoda SLM.

Z první kapitoly této práce je zřejmé, že kvalita povrchu součástí vyráběných aditivní technologií je závislá na mnoha faktorech. Obecně však platí, že současná úroveň technologie 3D tisku neumožňuje výrobu součástí, jejichž funkční plochy by byly použitelné ve výchozím stavu. Důvodem je poměrně velká nepřesnost, drsnost, která musí být na funkčních plochách snížena následným opracováním.

I po následném opracování se ovšem může stát, že povrch součásti nebude mít kvalitu odpovídající dané technologii obrábění. Důvodem je fakt, že jednotlivé stavební vrstvy nemusí být dokonale roztaveny a následně spojeny, nebo vlivem nečistot v prášku mohou být v součásti póry. Tyto vady totiž mohou být v určitém objemu součásti a i po odebrání stanoveného přídatku nemusí být odstraněny. Kromě těchto vad může nedostatečnou kvalitu povrchu způsobit také rozměrová a geometrická nepřesnost vytištěného vzorku, která při odebrání stanoveného přídatku zapříčiní vznik neobrobených nebo částečně obrobených ploch na obráběném povrchu součásti. K této skutečnosti nemusí dojít pouze vlivem nepřesností vzniklých při aditivní výrobě. Jelikož je aditivní výroba metodou SLM tepelný proces, vznikají ve zhotovované součásti při tuhnutí vnitřní napětí. Následným obráběním se tyto napětí mohou postupně uvolňovat, což způsobí deformaci přímo při obrábění. Právě tyto deformace mohou zvětšit výslednou geometrickou a rozměrovou nepřesnost součásti, která zapříčiní nedokonalé obrobení.

Z těchto skutečností lze předpokládat, že kromě samotné metody obrábění bude kvalita povrchu do jisté míry ovlivněna také druhem vnitřní struktury vzorku a výchozím stavem po 3D tisku. Z tohoto důvodu bude před samotným měřením a analýzou nejprve popsán celý

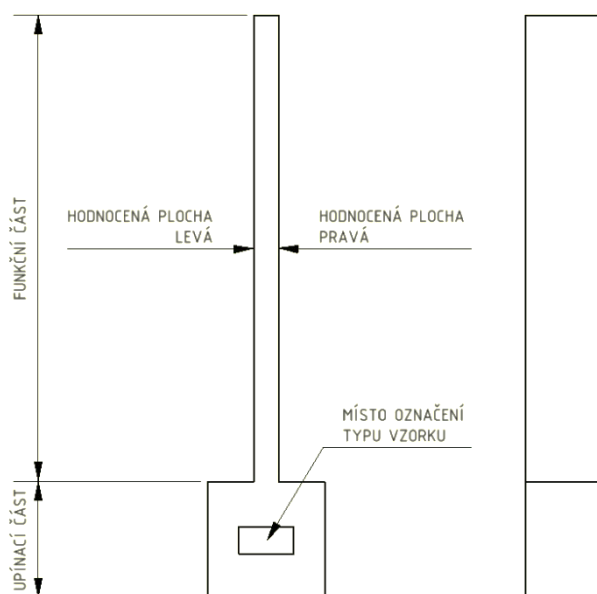
proces od zhotovení vzorků až po samotné vyhodnocení výsledků. Celý tento postup je zjednodušeně charakterizován následujícím schématem na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1- Schématický plán experimentu

### 3.1 Základní popis vzorku

Pro kontrolu kvality byl navržen vzorek viz příloha A. Jedná se o součást vyrobenou aditivní technologií metodou SLM z korozivzdorné oceli 316L. Tato součást je navíc vyrobena ve čtyřech typech, které se od sebe liší vnitřní strukturou. Každý vzorek se skládá z upínací a funkční části. Upínací část slouží k upnutí součásti při obrábění, na její čelní ploše je dále umístěno označení typu vzorku, které charakterizuje druh vnitřní struktury. Funkční část je tvořena žebrem, na jehož bočních plochách bude zkoumána kvalita povrchu. Schématické znázornění důležitých částí vzorku je možné vidět na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2 - Schématické znázornění důležitých částí vzorku

#### 3.1.1 Typy vzorků a jejich struktury

##### Vzorek No. 100 %

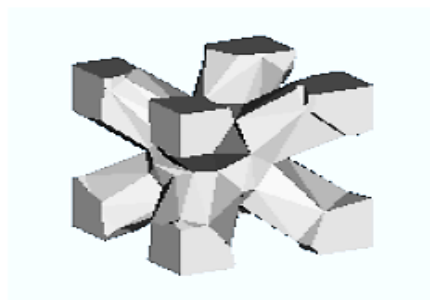
Jedná se o základní typ vzorku, který je vyplněn materiálem v celém svém objemu.

##### Vzorek No. 0 %

Jde o vzorek, který vychází ze vzorku No. 100 %, ovšem jeho funkční část (žebro) je dutá a síla každé stěny tohoto žebra je 0,5 mm.

### **Vzorek No. 1**

Tento typ vzorku je konstrukčně stejný jako vzorek No. 0 %. Rozdíl spočívá v tom, že objem jeho jádra není prázdný, ale je vyplněn pomyslnými kvádry o rozměrech 2 x 10 x 10 mm se strukturou Body diagonals with nodes rounded vybranou z knihovny programu Materialise Magics 22.0. Tato struktura je tvořena tělesovými úhlopříčkami pomyslných kvádrů se zaoblenými uzly. Základní pomyslný kvádr vyplněný tímto typem struktury reprezentuje obrázek 3.3.



*Obrázek 3.3 - Vnitřní struktura pomyslného kvádrů pro vzorek No.1*

### **Vzorek No. 2**

Vzorek tohoto typu opět vychází ze vzorku No. 0%. Prázdný objem jádra je u tohoto vzorku ovšem vyplněn pomyslnými kvádry o rozměrech 2 x 10 x 10 mm se strukturou Diamond 30, vybranou z knihovny programu Materialise Magics 22.0. Základní pomyslný kvádr vyplněný tímto typem struktury reprezentuje obrázek 3.4.



*Obrázek 3.4 - Vnitřní struktura pomyslného kvádrů pro vzorek No.2*

#### **3.1.2 Charakteristika materiálu vzorků**

Jedná se o materiál 316L, což je slitinová austenitická korozivzdorná ocel s nízkým obsahem uhlíku, vysokou tvrdostí a houževnatostí. Tento materiál má široké spektrum použitelnosti. Nejčastěji se používá k výrobě kuchyňského nádobí, chirurgických nástrojů, nebo forem pro vstřikování plastů. Pro technologii 3D tisku je tato ocel dodávána ve formě prášku přímo firmou Renishaw pod označením 316L-0407. <sup>7</sup>

## Základní fyzikální vlastnosti

Základní fyzikální vlastnosti materiálu 316L jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 - Základní fyzikální parametry materiálu 316L<sup>7</sup>

Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	7,99
Tepelná vodivost [W/mK]	16,2
Teplota tavení [°C]	1371 – 1399
Koeficient teplotní roztažnosti [K <sup>-1</sup> ]	16·10 <sup>-6</sup>

## Chemické složení

Společnost Renishaw udává ve svém katalogu pouze chemické složení vstupního prášku materiálu 316 L. Procentuální zastoupení jednotlivých chemických prvků je uvedeno v následující tabulce 2.<sup>7</sup>

Tabulka 2 - Chemické složení prášku materiálu 316L od firmy Renishaw<sup>7</sup>

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Ni [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	O [%]	N [%]
max 0,03	max 1	max 2	10 - 14	max 0,045	max 0,03	16 - 18	2 - 3	max 0,1	max 0,1

## Mechanické vlastnosti

Základní mechanické vlastnosti již ztaveného prášku materiálu 316L jsou rozdílné v jednotlivých směrech a jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.<sup>7</sup>

Tabulka 3 - Základní mechanické vlastnosti ztaveného prášku<sup>7</sup>

	vodorovný směr (osy X, Y)	svislý směr (osa Z)
R <sub>m</sub> [MPa]	676 ± 2	624 ± 17
R <sub>e</sub> [MPa]	547 ± 3	494 ± 14
A [%]	43 ± 2	35 ± 2
E [GPa]	197 ± 4	190 ± 10
Tvrdość [HV0,5]	198 ± 8	208 ± 6

### 3.2 3D tisk vzorků

Před samotným 3D tiskem byly vytvořeny 3D modely jednotlivých typů vzorků. Dále bylo stanoveno, že každý typ vzorku bude vyroben v sérii o dvanácti kusech. Celkem tedy bude vyrobeno 48 kusů vzorků.

Pro zhotovení vzorků metodou SLM bylo využito 3D tiskárny Renishaw AM 400 v Protolabu Vysoké školy báňské Technické univerzity Ostrava. V této tiskárně byly vzorky tištěny současně s pěti dalšími součástmi pro jiné účely. Ke zhotovení jednotlivých vrstev byla zvolena skenovací strategie meander. Procesní parametry, se kterými 3D tisk probíhal jsou uvedeny v tabulce 4. Celková doba tisku všech součástí s takto nastavenými parametry činila zhruba 36 hodin.

*Tabulka 4 – Základní procesní parametry 3D tisku*

Výkon laseru – P [W]	200
Rychlost skenování – v [mm/s]	650
Tloušťka vrstvy – h [ $\mu$ m]	50

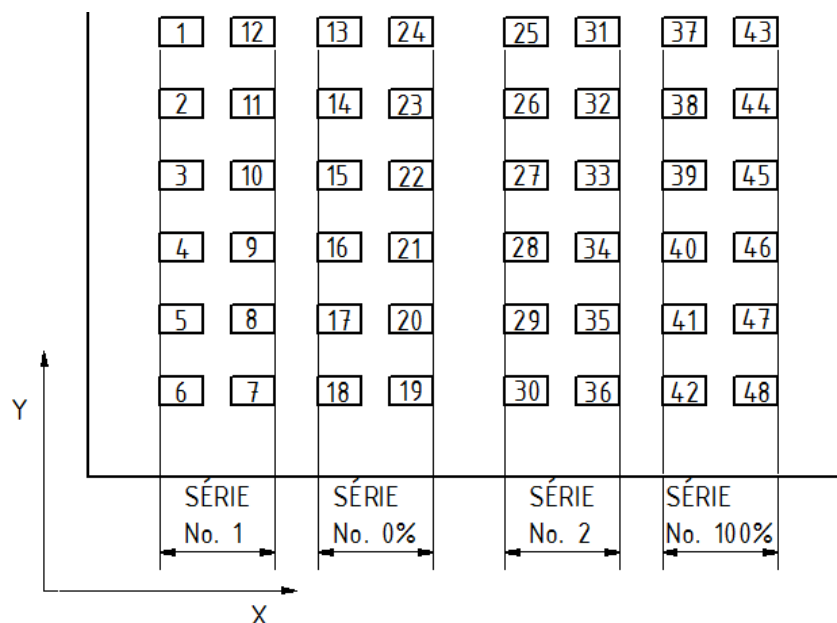
Po dokončení tisku byl z procesní komory odstraněn přebytečný prášek a stavební deska s vytištěnými součástmi byla vyjmuta. Na obrázku 3.5 je možné vidět zhotovené součásti ještě v procesní komoře.



*Obrázek 3.5 - Zhotovené součásti v procesní komoře*



Následně byly jednotlivé vzorky číselně označeny viz obrázek 3.6, aby byla známa pozice konkrétního vzorku při tisku. Po očíslování byla stavební deska se vzorky upnuta do svěráku pásové pily a následně byly vzorky odřezány z desky. Na koncích všech vzorků ovšem zůstaly podpůrné struktury, které by mohly ztěžovat ustavení a upínání vzorků při následném obrábění nebo měření. Z tohoto důvodu byly podpůrné struktury ze všech vzorků odstraněny odseknutím.



Obrázek 3.6 - Schéma číslování vzorků

### 3.3 Tepelné zpracování vzorků

Z podstaty metody SLM je zřejmé, že jde o tepelný proces, při kterém dochází k opakovanému rychlému ohřevu na teplotu tavení a následnému rychlému chladnutí. Tyto teplotní cykly nepochybně vedou ke vzniku vnitřních napětí. Dále je také struktura vytištěné součásti poměrně hrubá. Na základě těchto faktů byly navrženy dva druhy tepelného zpracování pro odstranění vnitřních napětí a zjemnění struktury následovně:

#### Tepelné zpracování 1

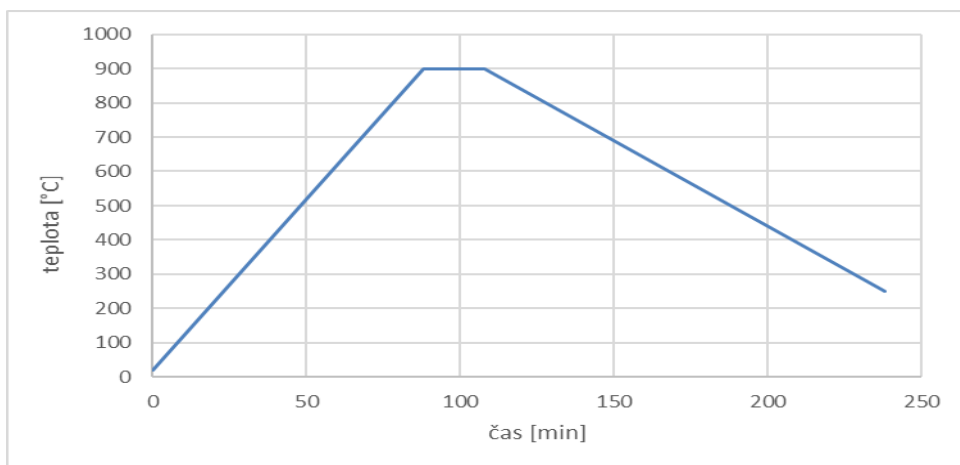
Pro první druh tepelného zpracování byly zvoleny níže uvedené parametry a grafické znázornění průběhu teplot je patrné z diagramu na obrázku 3.7.

Teplota: 900 °C

Výdrž na teplotě: 20 min

Rychlost ohřevu: 10 °C/min

Rychlost ochlazování: 5 °C/min do teploty 250 °C



Obrázek 3.7 - Diagram průběhu teplot tepelného zpracování 1

## Tepelné zpracování 2

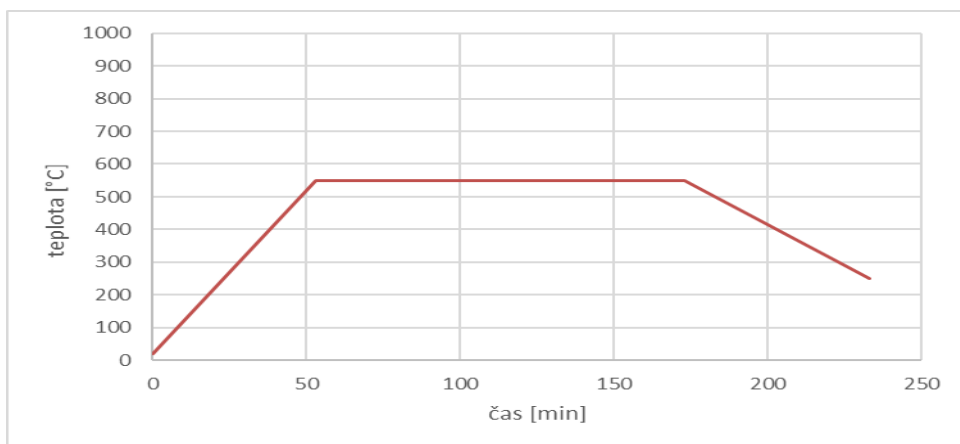
Pro druhý druh tepelného zpracování byly zvoleny níže uvedené parametry a grafické znázornění průběhu teplot je patrné z diagramu na obrázku 3.8.

Teplota: 550 °C

Výdrž na teplotě: 2 h

Rychlost ohřevu: 10 °C/min

Rychlost ochlazování: 5 °C/min do teploty 250 °C



Obrázek 3.8 - Diagram průběhu teplot tepelného zpracování 2

### 3.3.1 Výběr vzorků

Ze všech vytištěných vzorků bylo vybráno pro každý druh tepelného zpracování vždy po čtyřech kusech vzorků od každého typu. Tedy celkem 16 kusů vzorků pro jeden druh tepelného zpracování. Zbylých 16 kusů vzorků bylo ponecháno bez tepelného zpracování. Soubory vybraných vzorků pro jednotlivé druhy tepelného zpracování jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 - Výběr vzorků pro tepelné zpracování

Tep. zpracování 1	Tep. zpracování 2	Bez tep. zpracování
No. 0 % – 22	No. 0 % – 13	No. 0 % – 14
No. 0 % – 23	No. 0 % – 16	No. 0 % – 15
No. 0 % – 20	No. 0 % – 24	No. 0 % – 18
No. 0 % – 17	No. 0 % – 21	No. 0 % – 19
No. 100 % – 43	No. 100 % – 47	No. 100 % – 37
No. 100 % – 44	No. 100 % – 38	No. 100 % – 39
No. 100 % – 45	No. 100 % – 42	No. 100 % – 40
No. 100 % – 46	No. 100 % – 48	No. 100 % – 41
No. 1 – 6	No. 1 – 5	No. 1 – 1
No. 1 – 7	No. 1 – 8	No. 1 – 2
No. 1 – 9	No. 1 – 11	No. 1 – 3
No. 1 – 10	No. 1 – 12	No. 1 – 4
No. 2 – 30	No. 2 – 28	No. 2 – 29
No. 2 – 34	No. 2 – 31	No. 2 – 26
No. 2 – 35	No. 2 – 32	No. 2 – 25
No. 2 – 36	No. 2 – 33	No. 2 – 27

### 3.3.2 Provedení tepelných zpracování

Pro oba druhy tepelného zpracování bylo využito slinovací pece Xerion. Jako první byly do této pece vloženy vzorky vybrané pro tepelné zpracování 1. Před samotným ohřevem bylo v komoře pece vytvořeno vakuum o velikosti 1 Pa a následně byl do komory pece vháněn argon o průtoku 2 l/min k vytvoření ochranné atmosféry. Poté byly nastaveny stanovené parametry pro tepelné zpracování 1 a toto tepelné zpracování bylo provedeno. Po vyjmutí prvního souboru tepelně zpracovaných vzorků bylo provedeno tepelné zpracování 2 druhého souboru vzorků. Postup tohoto tepelného zpracování byl stejný jako u tepelného zpracování 1, pouze byly nastaveny odlišné parametry odpovídající tepelnému zpracování 2.

### 3.4 Výběr vzorků pro obrábění

Ze souboru tepelně nezpracovaných vzorků byly vybrány vždy 2 kusy od každého typu vnitřní struktury pro jednu metodu obrábění. Tedy 8 kusů vzorků pro obrábění frézováním

a 8 kusů vzorků pro metodu WEDM. Volba konkrétních vzorků byla provedena na základě jejich umístění při 3D tisku. viz tabulka 6.

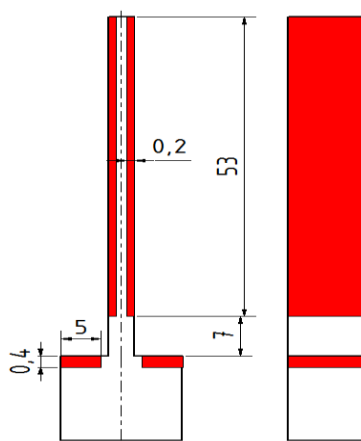
*Tabulka 6 - Vybrané vzorky bez tepelného zpracování*

Frézování	WEDM
No.0 % – 14	No.0 % – 18
No.0 % – 15	No.0 % – 19
No.100 % – 37	No.100 % – 40
No.100 % – 39	No.100 % – 41
No.1 – 1	No.1 – 3
No.1 – 2	No.1 – 4
No.2 – 25	No.2 – 29
No.2 – 27	No.2 – 26

### 3.5 Obrábění vzorků

K obrábění vzorků bylo zvoleno válcové frézování a elektroerozivní řezání metodou WEDM. Dále bylo stanoveno, že každou z těchto metod bude odebrána z obou bočních plochy funkční části vzorku. Hloubka řezu pro obě metody byla stanovena na 0,2 mm.

Jelikož budou vzorky pro účely jiných prací dále měřeny na třísouřadnicovém měřícím stroji, je nutné pro dotek sondy obrobit i horní plochy upínací části. Pro tento účel bylo zvoleno zhotovení dvou plošek o šířce 5 mm do hloubky 0,4 mm. Znázornění obráběných ploch je možné vidět na obrázku 3.9.

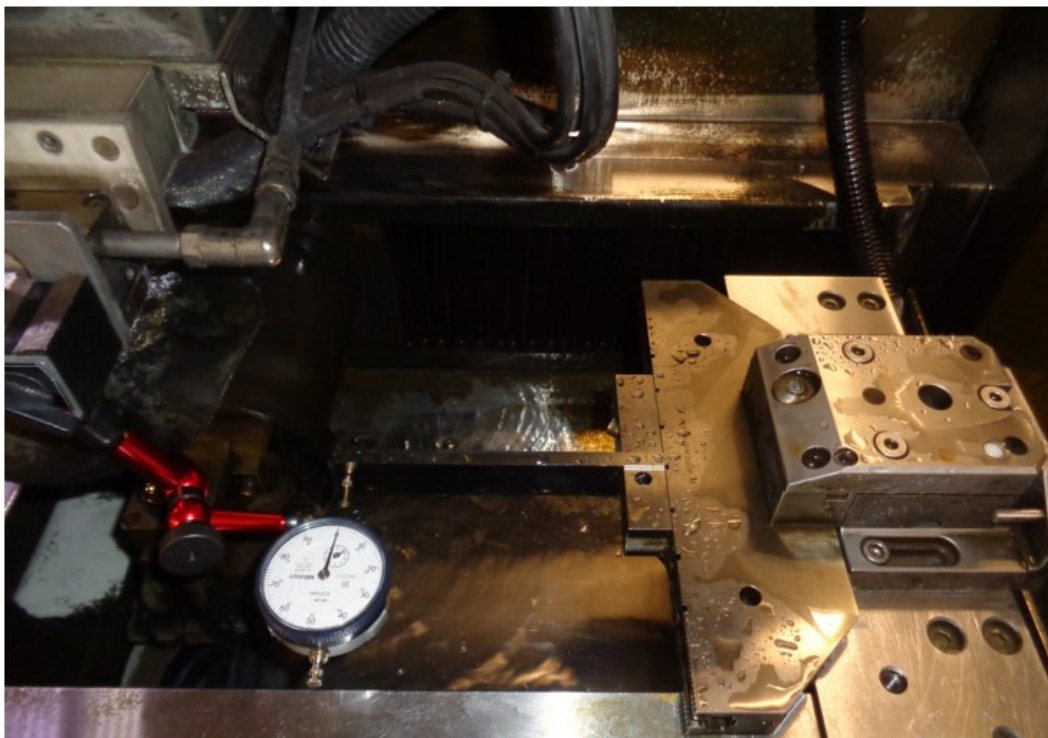


*Obrázek 3.9- Názorné zobrazení obráběných ploch*

### 3.5.1 Obrábění vzorků metodou WEDM

Obrábění metodou WEDM probíhalo v laboratoři Vysoké školy Báňské Ostrava na stroji CHMER G32F. Jako řezný nástroj byl použit povlakovaný mosazný drát o pevnosti  $1000 \text{ N/mm}^2$ . Pro přesný řez byl tento drát předepnut hmotností  $1610 \text{ g}$ . Jako dielektrikum byla použita voda z vodovodního řádu, která byla před použitím deionizována pomocí deionizační jednotky AQUA OSTOMIC O2.

Pro zaručení kolmosti řezu bylo jako první nutné vyrovnat svěrák tohoto stroje. K tomuto účelu bylo využito číselníkového úchylkoměru upnutého v magnetickém stojánu a přesně broušeného kontrolního hranolu. Tento hranol byl následně upnut do čelistí svěráku a číselníkový úchylkoměr byl umístěn tak, aby se jeho hrot dotýkal boční plochy hranolu co nejbližně čelisti svěráku. Následně byl číselníkový úchylkoměr vynulován a pomocí posuvu stroje byl úchylkoměr posunut, tak aby jeho hrot byl na konci boční plochy kontrolního hranolu viz obrázek 3.10. V tento okamžik byla z úchylkoměru odečtena odchylka. Takto zjištěná odchylka byla následně upravena natočením svěráku pomocí stavěcích šroubů. Po opětovné kontrole nastavení byl kontrolní hranol vyjmut ze svěráku. Takto vyrovnaný svěrák byl připraven k upínání vzorků.



*Obrázek 3.10- Nastavování kolmosti svěráku*

Před obráběním byl vzorek upnut za jeho upínací část do svěráku stroje ve vodorovné poloze, označením typu vzorku vzhůru. Takto upnutý vzorek byl následně ustaven do přesné vodorovné polohy pomocí číselníkového úchylkoměru umístěného v magnetickém stojánu,

jak je vidět na obrázku 3.11. Posuvem stroje byl číselníkový úchylkoměr přesunut nejprve na začátek funkční části vzorku a v tento okamžik byl vynulován. Poté byl úchylkoměr přesunut na konec funkční části a zjištěná odchylka byla opravena jemným poklepem na vzorek. Po tomto vyrovnaní vzorku byla ještě provedena opětovná kontrola ustavení a když bylo vše v pořádku byl úchylkoměr se stojánkem odstraněn. Ustavení vzorku tímto způsobem bylo poměrně jednoduché, jelikož upínací síla svěráku je velmi malá. Při drátovém řezání totiž nevznikají řezné síly a upnutí zamezuje pouze pohybu vyvolanému gravitační silou.



*Obrázek 3.11 - Nastavování vodorovné polohy vzorku*

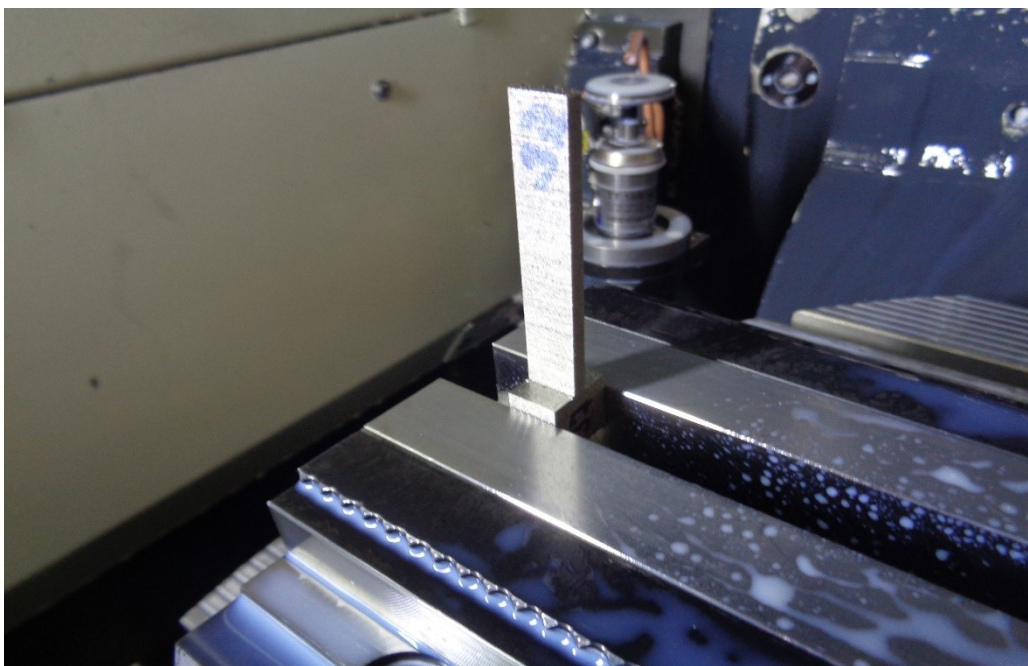
Na takto ustaveném vzorku byla z důvodu zaručení co nejvyšší přesnosti změřena vždy šířka upínací části a tloušťka funkční části. Jako výchozí bod pro řezání byl stanoven roh upínací části, ke kterému bylo následně opatrně a co nejpresněji přijeto drátem. V tento okamžik byl v dílenském programování stroje vytvořen program pro zhotovení kontrolních plošek. Následným spuštěním tohoto programu byly požadované plošky obrobena. Po zhotovení kontrolních plošek byl napsán a spuštěn program tentokrát pro obrobení bočních ploch funkční části vzorku. Obrábění každé boční plochy bylo vždy započato kolmým zářezem do hloubky 0,04 mm ve vzdálenosti 7 mm od horní plochy upínací části. Velikost hloubky zářezu byla stanovena na základě experimentálně zjištěné velikosti mezery mezi drátem a obrobkem, která činila 0,16 mm. Takto byla dodržena stanovená hloubka řezu 0,2 mm. Parametry řezu byly v průběhu řezání neustále upravovány pro co možná



nejplynulejší a nejkvalitnější řez. Popsaný postup, byl kromě prvotního vyrovnaní svěráku následně opakován u všech vzorků vybraných pro tuto metodu.

### 3.5.2 Obrábění vzorků frézováním

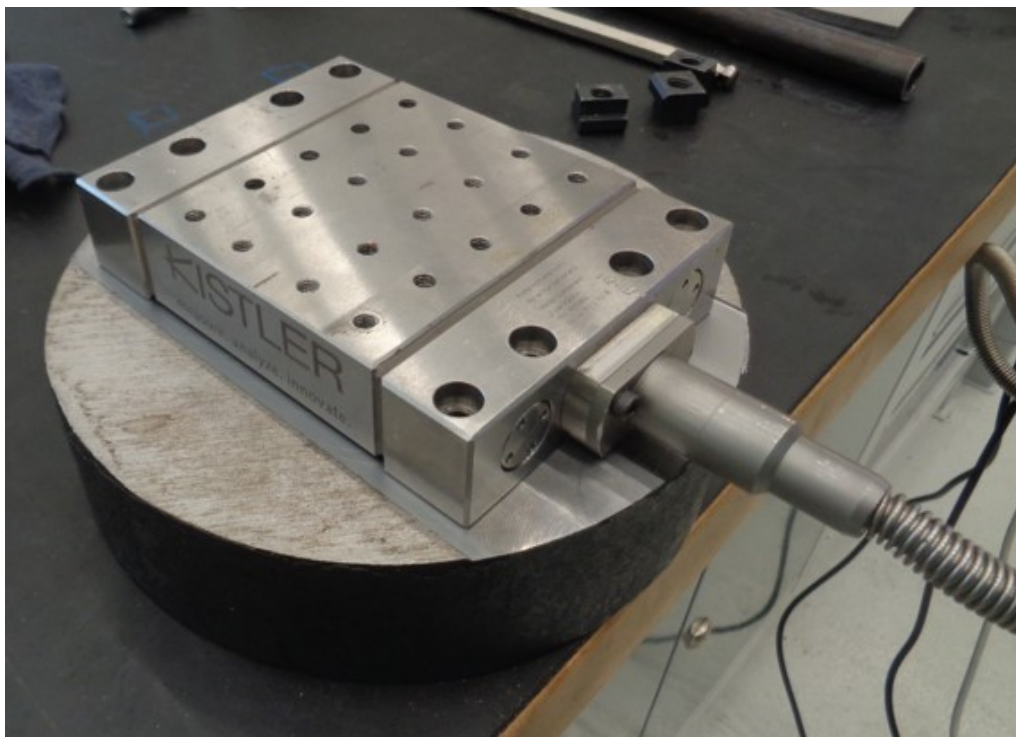
Frézování bylo prováděno na frézovacím obráběcím centru DMG MORI DMU 50 v dílnách Vysoké školy báňské Ostrava. Před samotným frézováním stanovených bočních ploch bylo nutné navíc ofrézovat na každém vzorku již zmíněné plošky na horních plochách upínacích částí pro účely následného měření. Pro frézování těchto plošek byl postupně každý vzorek vložen v kolmé poloze upínací částí do strojního svěráku a po následném vyrovnaní pomocí úhelníku byl upnut, jak je vidět na obrázku 3.12. V dalším kroku byl vytvořen NC program a po odměření obrobku byla odměřovací sonda vyměněna za čelní frézu tříbřitou o průměru 20 mm. Následně byl spuštěn program. Frézování těchto plošek bylo provedeno následujícími reznými podmínkami:  $v_c = 50 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,08 \text{ mm}$ .



*Obrázek 3.12 - Upnutý vzorek pro frézování kontrolních plošek*

Jakmile byly na všech vzorcích zhotoveny zmíněné kontrolní plošky mohlo být započato obrábění bočních ploch vzorků. Jelikož bylo ovšem nutné provést také měření rezných sil při obrábění, nemohlo být pro tuto operaci k upnutí vzorku použito strojního svěráku upevněného na pracovním stole stroje. Z tohoto důvodu musel být mezi pracovní stůl stroje a svěrák vřazen také dynamometr Kistler 9129 AA. Tento dynamometr má ovšem omezené možnosti upínání, proto nebylo možné jej jednoduše upnout k pracovnímu stolu a následně k němu připevnit i dosud používaný strojní svěrák. Na obou koncích tohoto dynamometru jsou totiž pro jeho upnutí ke stroji zhotoveny čtveřice děr se zahloubením pro

šrouby M6. Rozteče těchto děr společně s jejich velikostí znemožňovaly přímé upnutí dynamometru k pracovnímu stolu stroje. Z tohoto důvodu muselo být použito speciálně vyrobené upínací desky, jak je vidět na obrázku 3.13. Tato upínací deska je pro upnutí dynamometru opatřena čtyřmi dírami s vnitřními závity M6 v požadovaných roztečích.

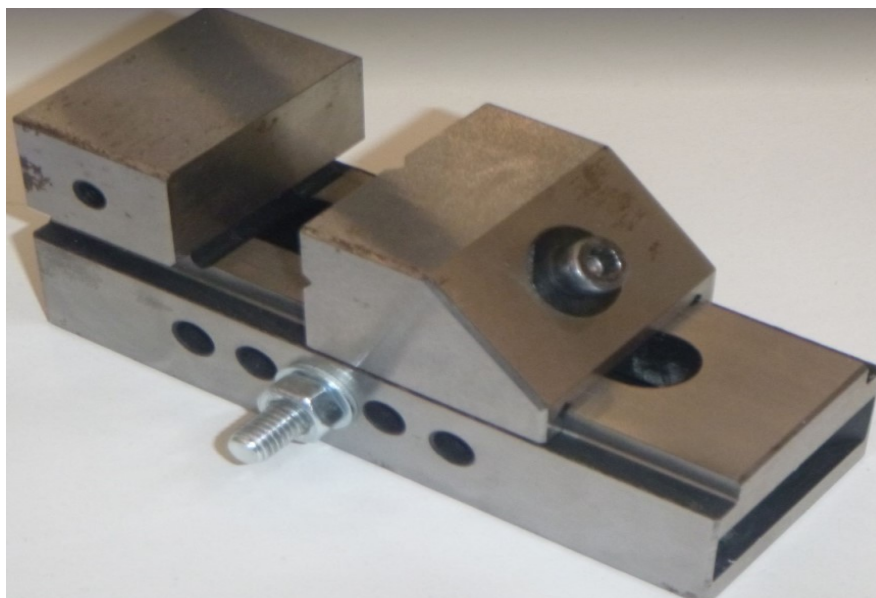


*Obrázek 3.13 – Dynamometr Kistler 9129 AA umístěný na upínací desce*

Dynamometr byl k této desce tedy následně upnut přes čtveřici děr v jeho rozích pomocí šroubů M6 s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem. Takto vytvořený komplet byl položen na pracovní stůl stroje a po následném hrubém srovnání byl za upínací desku upnut pomocí trojice upínek s podpěrkami.

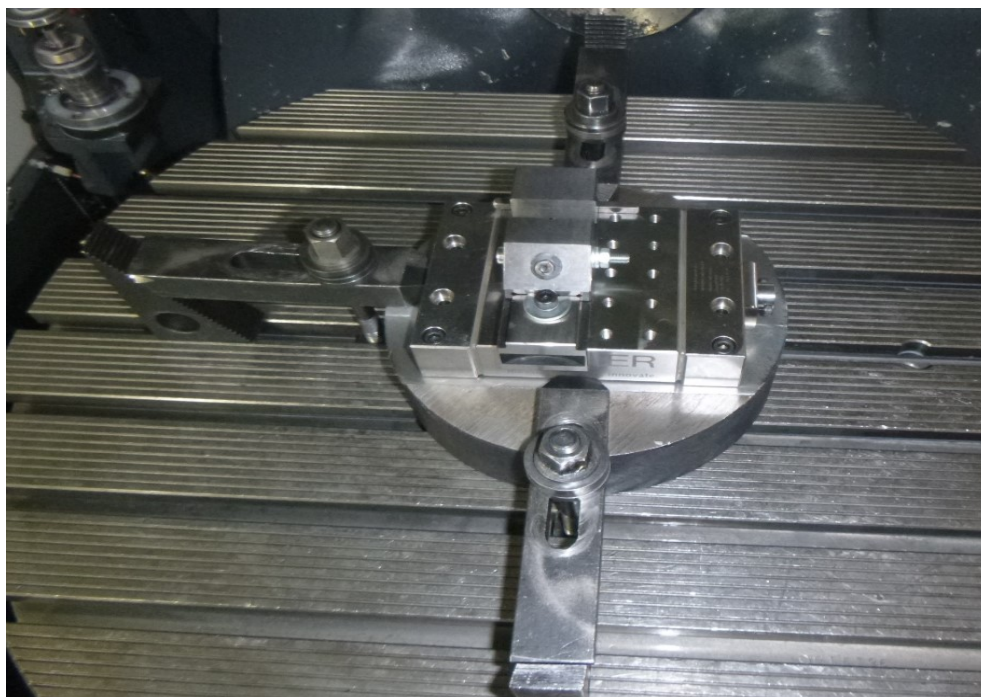
Pro upínání vzorků byl vybrán přesný svěrák QKG 25, patrný z obrázku 3.14. V dalším kroku přípravy bylo potřebné provést upnutí tohoto svěráku k dynamometru. Toto upnutí se ovšem ukázalo jako poměrně náročné. Přestože byl vybrán ten nejmenší dostupný svěrák, jeho délka byla oproti délce upínací plochy dynamometru větší. Tato skutečnost znemožňovala využít pro upnutí vybrání na koncích svěráku.





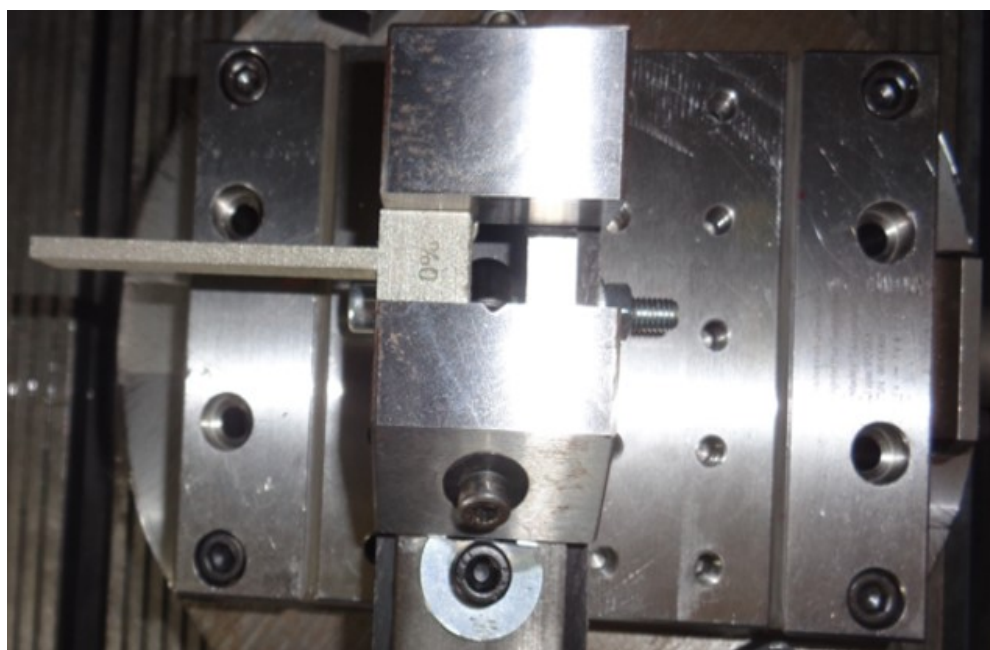
*Obrázek 3.14 - Přesný svěrák QKG 25*

Jako možné řešení této skutečnosti se ukázalo upnutí šroubem s podložkou přes podélný otvor uprostřed svěráku. Při pokusu o tento způsob upnutí bylo zjištěno, že vložený šroub je možné zašroubovat do jedné z děr se závitem M 6 v upínací ploše dynamometru. Mimo jiné bylo ale zjištěno, že pohyblivá čelist svěráku znemožňuje dokonalé dosednutí podložky na plochu svěráku. Z tohoto důvodu byla podložka upravena uříznutím její části. Následně byla upravená podložka nasunuta na šroub a bylo provedeno kontrolní upnutí jednoho konce svěráku tímto způsobem. Tento způsob upnutí byl následně vyhodnocen jako vhodný a bylo přistoupeno k upnutí druhého konce svěráku. Upnutí druhého konce svěráku bylo již jednodušší, jelikož jeho konec nepřekrýval díru se závitem v upínací ploše dynamometru. Díky této skutečnosti bylo pro upnutí využito vybrání na konci svěráku, za použití malé upínky s podpěrou a šroubu M6. Následně byly oba upínací šrouby nepatrně povoleny a svěrák byl vůči dynamometru vyrovnán pomocí úhelníku. Po dotažení upínacích šroubů byla již celá sestava patrná z obrázku 3.15 připravena pro upínání a následné obrábění vzorků.



*Obrázek 3.15 - Upnutí dynamometru a svěráku k pracovnímu stolu stroje*

V dalším kroku byl do čelistí svěráku vložen ve vodorovné poloze plochou s označením typu vzorku vzhůru samotný vzorek. Takto ustavený vzorek byl následně upnut za upínací část viz obrázek 3.16.



*Obrázek 3.16- Detail upnutí vzorku ve svěráku QKG 25*

Po upnutí bylo provedeno vyrovnaní vzorku pomocí měřicí sondy natočením pracovního stolu obráběcího centra. V tento okamžik bylo měřící sondou provedeno odměření vzorku před obráběním. K obrábění bočních ploch bylo použito stopkové monolitní frézy čtyřbřité

ze slinutého karbidu Sandvik 1P341 – 1000 – XA o průměru 10 mm patrná z obrázku 3.17. K upnutí této frézy bylo použito v upínače TENDO EC HSK-A63 Ø20.



*Obrázek 3.17 - fréza Sandvik 1P341 – 1000 – XA <sup>22</sup>*

Jelikož použití dynamometru znemožňovalo využití chlazení kapalinou, bylo nutné stanovit vhodné řezné podmínky, aby při obrábění nedocházelo ke vzniku velkého množství tepla. Vysoká teplota by totiž při obrábění materiálu 316L mohla způsobovat tvorbu nárůstků. Na základě tohoto faktu a zkušeností obráběče byla stanoveny řezné podmínky následovně:

- $v_c = 50 \text{ m/min}$ ,
- $f_z = 0,1 \text{ mm}$ ,
- $a_p = 0,2 \text{ mm}$ .

Dále bylo stanoveno, že frézování každé strany bude prováděno sousledným způsobem. Po nastavení všech stanovených podmínek byl v dílenském programování stroje vytvořen NC program a bylo započato obrábění. Po obrobení prvního vzorku byl celý postup od upínání vzorku až po obrábění opakován u všech vybraných vzorků.

Při frézování každého vzorku docházelo vlivem jeho nízké tuhosti k pružnému ohýbání obráběného žebra. Tento ohyb zapříčinil nedokonalé obrobení každé strany zhruba od poloviny délky obráběné plochy.

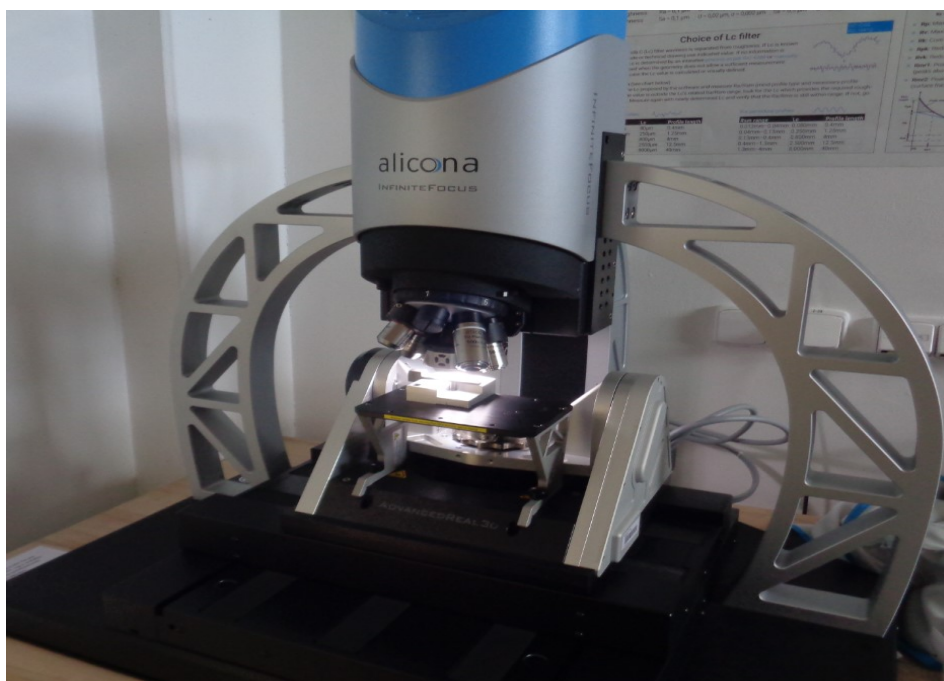
## 4 Měření a analýza vybraných parametrů drsnosti vzorků.

### 4.1 Skenování povrchu vzorků

Ke zjištění potřebných parametrů drsnosti a vlnitosti povrchu bylo využito skenování povrchu pomocí optického 3D mikroskopu Alicona infinitefocus G5. Jde o bezdotykovou metodu snímání struktury povrchu při které měřicí přístroj opticky zaznamenává povrch součásti v podobě snímků. Získané snímky poté slouží právě k vyhodnocování a zjišťování potřebných parametrů charakterizujících povrch součásti.

#### 4.1.1 Charakteristika optického 3D mikroskopu Alicona infinitefocus G5

Jedná se o bezdotykové, optické měřicí zařízení s vysokou přesností. Pomocí tohoto přístroje je možné nasnímat a analyzovat v podstatě jakýkoliv povrch. Ze zhotovených snímků lze také následně pomocí softwaru změřit nejen parametry plošné (3D) drsnosti, ale také parametry drsnosti profilové (2D). Tato schopnost je velkou výhodou, jelikož jeden tento mikroskop zastoupí dotykové měřicí stroje, u kterých by hrozilo poškození snímacího hrotu při měření součástí s velmi drsným povrchem. Největší uplatnění tento mikroskop nalézá při kontrole malých součástí lékařských přístrojů, nebo součástí automobilů. Tento optický mikroskop Alicona infinitefocus G5 je znázorněn na obrázku 4.1.<sup>18</sup>



*Obrázek 4.4.1 - Optický mikroskop Alicona infinitefocus G5*

Pro snímání povrchu je tento měřicí přístroj vybaven šesti objektivy s různým stupněm přiblížení. Tyto objektivy jsou zabudovány v otočné hlavici, která umožňuje výběr objektivu

s patřičným přiblížením. Ke zhotovení snímku je vždy používáno pouze jednoho objektivu. Celá otočná hlavice je upevněna ke svislé posuvové jednotce. Tato jednotka je uložena na portálu stroje a slouží ke změně vzdálenosti mezi objektivem a snímaným povrchem, což umožňuje nastavení vhodného zaostření snímku. K ustavování součástí pro snímání je tento přístroj vybaven přesným stojánkem s připevněnou ustavovací podložkou umístěným na pohyblivém pracovním stole přístroje.<sup>18</sup>

Tento měřicí přístroj je propojen se stolním počítačem, pomocí kterého je přes program Alicona MeasureSuite 5.3.4. ovládán a nastavován.<sup>18</sup>

#### **4.1.2 Zásady pro skenování obrobených částí bočních ploch**

Na základě skutečnosti, že u vzorků po frézování nebyly vlivem ohybu žebra dokonale obrobeny boční plochy bylo nutné stanovit vhodný způsob a místo snímání. Na základě objektivnosti výsledků bylo stanoveno, že pro analýzu obrobených ploch po frézování a metodě WEDM budou snímky provedeny uprostřed délek obrobených ploch, v kolmém směru vůči ploše s označením typu vzorku na upínací části. Dále bylo určeno, že bude tímto postupem nasnímana levá i pravá strana vzorku a na každé straně budou provedeny vždy tři snímky v různých místech ve směru od plochy s označením typu vzorku.

#### **4.1.3 Zásady skenování neobrobených částí bočních ploch**

K orientačnímu porovnání kvality povrchů vzorků po 3D tisku a dvou druhích tepelného zpracování bylo stanoveno, že na každé straně vzorku bude proveden vždy jeden snímek. Dále bylo stanoveno, že tento snímek bude proveden uprostřed neobrobeného „čtverce“ o rozměrech 15x7 mm v případě snímání již obrobených vzorků. Pro snímání neobrobených vzorků po tepelných zpracováních byla tato poloha snímku stanovena stejně z důvodu objektivnosti. Pro tyto účely byl vybrán vždy jeden vzorek od každého typu dle tabulky 7.

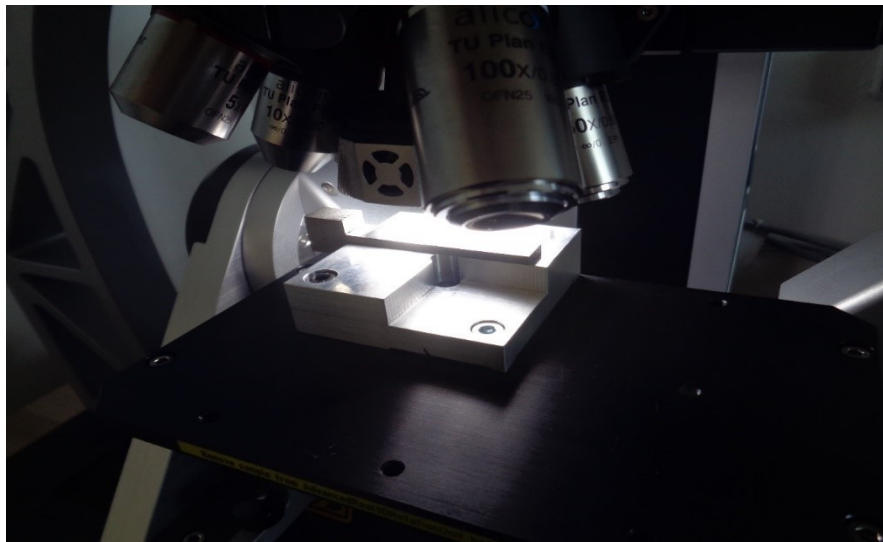
*Tabulka 7 - Vzorky pro skenování neobrobených ploch*

Vzorky bez tep. zpracování	Vzorky - tep. zpracování 1	Vzorky - tep. zpracování 2
No. 0 % – 18	No. 0 % – 22	No. 0 % – 13
No. 100 % – 40	No. 100 % – 44	No. 100 % – 38
No. 1 – 3	No. 1 – 6	No. 1 – 11
No. 2 – 29	No. 2 – 34	No. 2 – 31



#### 4.1.4 Postup skenování

K ustavení vzorku pro snímání bylo použito přesně broušené podložky, na kterou byl vzorek ustavován dle výše zmíněných zásad. Ustavený vzorek pro snímání je možné vidět na obrázku 4.2.



*Obrázek 4.2 - Ustavený vzorek pro snímání povrchu*

Po tomto ustavení byl vybrán objektiv o přiblížení 20x. V tento okamžik bylo najeto pomocí polohování pracovního stolu do stanoveného místa. Následně byly v programu Alicona MeasureSuite 5.3.4 zadány veškeré potřebné parametry pro snímání. Poté bylo provedeno zaostření objektivu a bylo započato samotné snímání. Tento postup byl následně opakován u pořizování každého snímku, na všech vybraných vzorcích.

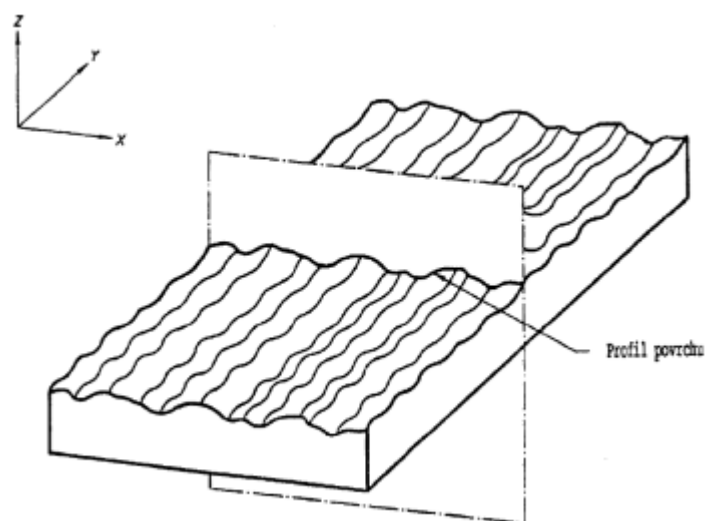
## 4.2 Výběr sledovaných parametrů

Pro stanovení kvality povrchu bylo vybráno sledování parametrů profilové charakteristiky povrchu (2D) a parametrů plošné charakteristiky (3D).

Mezi profilové parametry byly vybrány parametry drsnosti  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{Sm}$  a parametr charakterizující vlnitost profilu  $W_z$ . Pro plošnou charakteristiku povrchu byl zvolen výškový parametr drsnosti  $S_z$  a tři objemové parametry drsnosti  $V_{vv}$ ,  $V_{mp}$ ,  $V_{vc}$ .

### 4.2.1 Profilová charakteristika povrchu

Tato charakteristika vychází z pomyslného řezu skutečného povrchu tělesa rovinou v určitém místě a směru. Skutečným povrchem tělesa se rozumí povrch, který vymezuje celé těleso a odděluje jej od okolního prostředí. Tímto pomyslným řezem vznikne na řezné rovině průsečnice, která reprezentuje právě profil povrchu, jak je vidět na obrázku 4.3.<sup>4</sup>



Obrázek 4.3 - Schéma pomyslného řezu skutečného povrchu rovinou <sup>4</sup>

Velkou nevýhodou této charakteristiky je její neschopnost vypovídat o celkovém stavu povrchu. Z tohoto důvodu je nutné při jejím využití vždy zvolit vhodný směr, ve kterém bude profil vykazovat nejvyšší hodnoty sledovaných parametrů. <sup>4</sup>

#### Popis zvolených profilových parametrů:

##### Parametr Ra

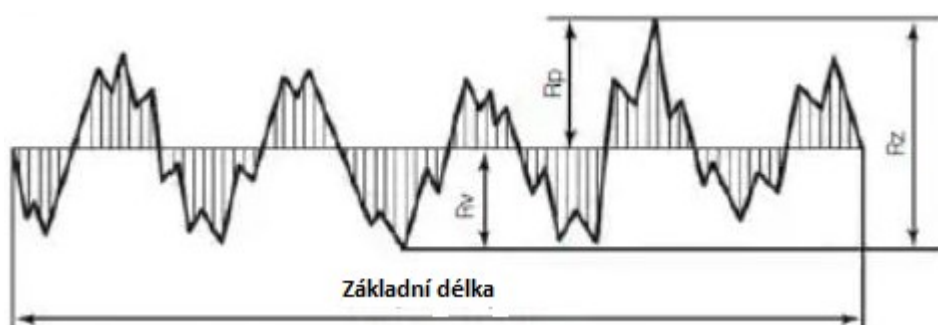
Jedná se o výškový parametr drsnosti, který představuje střední aritmetickou úchylku profilu. Parametr Ra je ze všech parametrů charakterizujících profilovou drsnost asi nejznámějším a nejpoužívanějším. Nevýhodou charakterizace profilu povrchu parametrem Ra je jeho nízká vypovídající hodnota v případě členitých povrchů s náhodnými výstupky, či prohlubněmi. Tuhle skutečnost je možné vidět na obrázku 4.4. Tento parametr je nejvíce vhodný pro charakterizování neperiodického profilu povrchu bez výrazných rozdílů mezi výstupky a prohlubněmi, například povrchy po leštění, nebo broušení. <sup>4,19</sup>



Obrázek 4.4 - Schématické znázornění parametru Ra <sup>4</sup>

### **Parametr Rz**

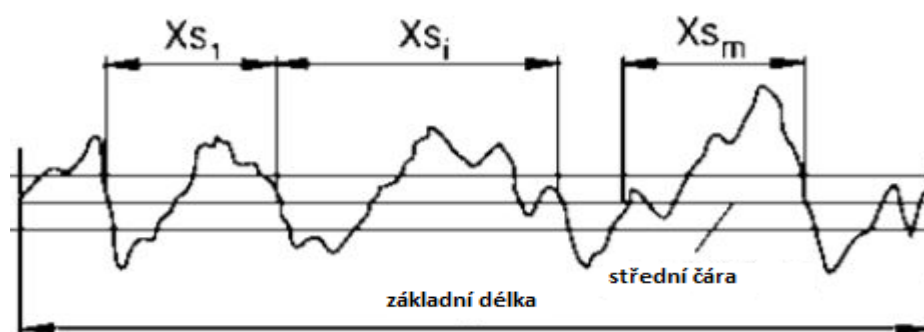
Tento výškový parametr drsnosti charakterizuje největší výšku profilu, tedy jde o součet hloubky nejhlubší prohlubně  $R_v$  a výšky nejvyššího vrcholu profilu  $R_p$ , jak je patrné z obrázku 4.5. Charakterizace profilu tímto parametrem je velmi vhodná pro členité povrchy. Tento parametr totiž ukazuje reálný rozdíl nerovností profilu bez zkreslení způsobeného zprůměrováním. Z tohoto důvodu je tento parametr vhodný k charakteristice profilu povrchů, u kterých se předpokládá náhodný výskyt vad. Pomocí tohoto parametru je vhodné charakterizovat dosedací nebo těsnící plochy dvou protilehlých součástí. <sup>4</sup>



Obrázek 4.5 - Schématické znázornění parametru  $R_z$  <sup>21</sup>

### **Parametr RSm**

Parametr  $R_{Sm}$  je délkový parametr drsnosti, který reprezentuje průměrnou šířku jednotlivých prvků profilu. Jedná se vlastně o průměrnou hodnotu roztečí průsečíků prvků profilu  $X_s$  se střední čarou viz obrázek 4.6. Tento parametr je vhodný k charakterizaci povrchů s periodickou strukturou. <sup>5,19</sup>



Obrázek 4.6 - Schématické znázornění šířky prvků profilu <sup>24</sup>

### **Parametr Wz**

Pomocí výškového parametru  $W_z$  je charakterizován profil vlnitosti, a to konkrétně největší výškou profilu. Tento parametr je vhodné použít k charakterizaci profilu povrchů, které slouží jako těsnící plochy. <sup>4</sup>



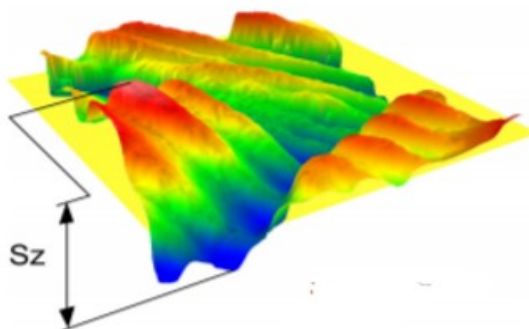
#### 4.2.2 Plošná charakteristika povrchu

Plošná charakteristika umožňuje provést analýzu povrchu jako celku. Pomocí této charakteristiky je tedy možné získat reálné parametry povrchu bez omezení směrem nebo polohou, jako je to u charakteristiky profilové. Díky této skutečnosti je možné získat dokonalejší představu o zkoumaném povrchu a na základě zjištěných parametrů lépe odhadnout provozní vlastnosti funkčních ploch. Ke zjišťování parametrů této charakteristiky je využíváno bezdotykové vyhodnocování opticky získaných snímků.<sup>4</sup>

##### Popis zvolených plošných parametrů:

##### Parametr Sz

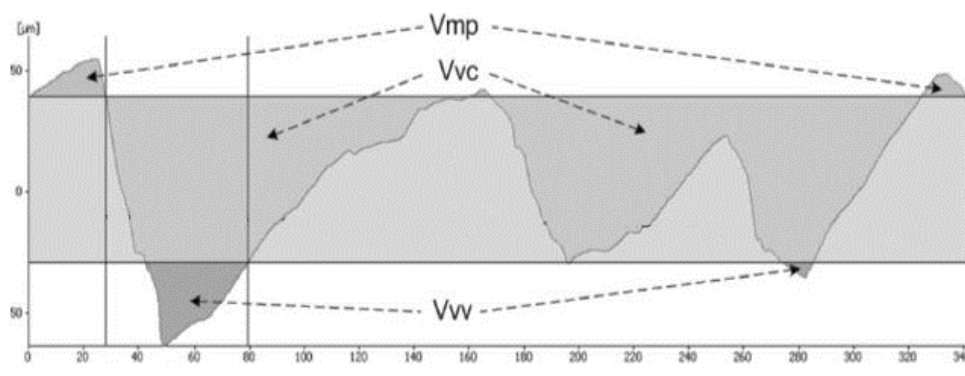
Jde o výškový parametr reprezentující plošnou drsnost, který charakterizuje maximální výšku omezené stupnice povrchu. To znamená, že se jedná o součet hloubky nejhlubší prohlubně a výšky nejvyššího výstupku z celé sledované plochy. Tento parametr je prostorovou obdobou parametru Rz a nachází stejné uplatnění, jako již zmíněný profilový parametr. Názorně je parametr Sz vidět na obrázku 4.7.<sup>4</sup>



Obrázek 4.7 - Znázornění parametru Sz<sup>6</sup>

##### Parametr Vvv

Jedná se o objemový parametr, který představuje objem všech prohlubní povrchu pod stanoveným materiálovým jádrem. Jednotkou tohoto parametru je  $\text{ml/m}^2$ . Pomocí tohoto parametru je možné zjistit objem pórů a dalších hloubkových vad v povrchu. Znázornění tohoto parametru společně s ostatními objemovými parametry je na obrázku 4.8.<sup>2, 26</sup>



Obrázek 4.8 -Znázornění objemových parametrů  $V_{vv}$ ,  $V_{mp}$ ,  $V_{vc}$

### **Parametr $V_{mp}$**

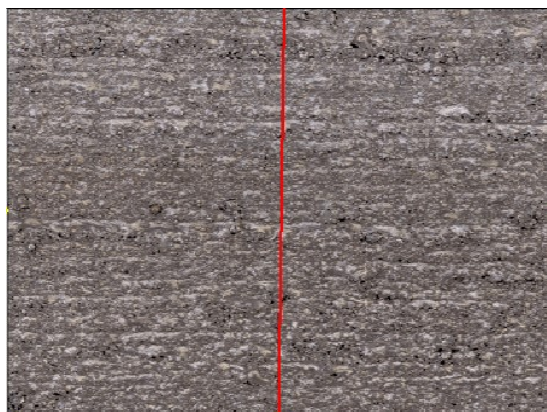
Tento objemový parametr charakterizuje plošnou drsnost povrchu v podobě objemu nejvyšších vrcholů nad stanoveným materiálovým jádrem v  $\text{ml/m}^2$ . Znázornění tohoto objemu v profilovém řezu je vidět na obrázku 4.8. Na základě tohoto parametru je možné u funkčních ploch zjistit objem materiálu výstupků, které se během krátké doby provozu opotřebují.<sup>25</sup>

### **Parametr $V_{vc}$**

Objemový parametr plošné drsnosti, který určuje materiálem nevyplněný objem stanoveného materiálového jádra v  $\text{ml/m}^2$ . Objem charakterizovaný tímto parametrem je možné vidět na profilovém řezu na obrázku 4.8. Pomocí tohoto parametru je možné zjistit objem prohlubní (pórů, vad) ve stanoveném nosném materiálovém jádru. V případě funkčních mazaných součástí lze pomocí tohoto parametru zjistit jaký objem maziva je funkční povrch schopen pojmout.<sup>27</sup>

## **4.3 Vyhodnocování provedených snímků**

Po zhotovení všech snímků, bylo provedeno jejich vizuální zhodnocení. Na základě tohoto hodnocení bylo ze všech snímků vybráno vždy šest snímků pro každou dvojici vzorků se stejným typem struktury. K získání všech zvolených parametrů bylo provedeno vyhodnocení jednotlivých snímků v programu Alicona MeasureSuite 5.3.4. V tomto programu byly u každého snímku nejprve zjišťovány parametry profilové drsnosti a vlnitosti. Před každým měřením byla umístěna vyhodnocovací úsečka vždy do středu snímku ve směru posuvu nástroje u obráběných ploch. V případě všech neobrobených ploch byla vyhodnocovací úsečka umístěna vždy do středu snímku kolmo na jednotlivé stavební vrstvy. Umístění vyhodnocovací úsečky pro neobrobený povrch znázorňuje obrázek 4.9.



*Obrázek 4.9 - Znáznornění polohy vyhodnocovací úsečky*

V tento okamžik bylo provedeno na každém vyhodnocovaném snímku zkušební vyhodnocení drsnosti. Na základě zjištěných hodnot parametrů byla dle norem ČSN EN ISO 3274 a ČSN EN ISO 4288 nastavena tloušťka vyhodnocovací úsečky která reprezentovala daný poloměr zaoblení hrotu a dále byla nastavena odpovídající hodnota filtrace. Po tomto nastavení už bylo možné postupně z každého snímku získat parametry plošné drsnosti  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{Sm}$  a parametr vlnitosti  $W_z$ .

Jakmile byly získány tyto parametry bylo přistoupeno ke zjišťování parametrů charakterizujících plošnou drsnost, tedy  $S_z$ ,  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{vc}$ . K získání hodnot těchto parametrů bylo nutné označit co největší plochu snímku, ze které budou parametry vyhodnocovány. Tímto způsobem bylo postupováno u vyhodnocování každého snímku.

Všechny získané parametry byly během vyhodnocování postupně zapisovány do tabulek a následně statisticky zpracovány.

#### **4.4 Zpracování získaných hodnot po frézování a WEDM**

Hodnoty sledovaných parametrů získané vyhodnocením snímků byly zapisovány do tabulek v programu Microsoft Excel 2016. Zde byl pomocí vzorců vypočten výběrový průměr, standartní nejistota typu A, standartní nejistota typu B, kombinovaná nejistota a rozšířená nejistota měření.

##### **4.4.1 Vzorový výpočet**

Pro vzorový výpočet bylo vybráno statistické zpracování zjištěných parametrů  $R_a$  pro vzorky No. 100 % - 40 a No. 100 % - 41 po obrábění technologií WEDM viz tabulka 8.

Tabulka 8 - Tabulka statistického zpracování naměřených hodnot parametru Ra

Č. měření	Ra [μm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [μm]		
1	1,561	0,004011	u <sub>A</sub> [μm]	0,0533
2	1,288	0,043960	u <sub>B1</sub> [μm]	0,0173
3	1,389	0,011808	u <sub>B2</sub> [μm]	0,03
4	1,630	0,017512	u <sub>c</sub> [μm]	0,0774
5	1,573	0,005675	U [μm]	0,1549
6	1,545	0,002240		
Suma [μm]	2,986	<b>0,08521</b>		
$\bar{x}$ [μm]	<b>1,4977</b>			

### Výpočet výběrového průměru:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{6} \cdot 2,986 = 1,4977 \mu m \quad (2)$$

Kde:

n... počet naměřených hodnot

x<sub>i</sub>...jednotlivá naměřená hodnota

### Výpočet standartní nejistoty typu A

$$u_A = s_{(\bar{x})} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} = \sqrt{\frac{0,08521}{6 \cdot (6 - 1)}} = 0,0533 \mu m \quad (3)$$

Kde:

s<sub>( $\bar{x}$ )</sub>... výběrová směrodatná odchylka

Jelikož soubor obsahuje šest hodnot je nutné nejistotu u<sub>a</sub> vynásobit koeficientem k<sub>s</sub>. Souboru šesti hodnot odpovídá koeficient k<sub>s</sub> = 1,3

$$u_A = k_s \cdot s_{(\bar{x})} = 1,3 \cdot 0,0533 = 0,0693 \mu m \quad (4)$$

### Výpočet standartní nejistoty typu B

Pro výpočet standartní nejistoty typu B byly vtypovány a odhadnuty dva zdroje nejistot následovně: Vliv ustavení vzorku na podložce u<sub>z1</sub> = 2 % z naměřené hodnoty a Vliv

nedokonalosti měřicího přístroje  $u_{z2} = 2 \%$  z naměřené hodnoty. Na základě těchto vlivů byly vypočteny složky standartní nejistoty typu B  $u_{B1}$ ,  $u_{B2}$ .

Nejistota ustavení vzorku na podložce:

$$u_{B1} = \frac{u_{z1} \cdot \bar{x}}{k} = \frac{0,02 \cdot 1,4977}{\sqrt{3}} = 0,0173 \mu m \quad (5)$$

Kde:

k... součinitel nejistot - Stanoven pro rovnoměrné rozdělení -  $k = \sqrt{3}$

Nejistota měřicího přístroje:

$$u_{B2} = u_{z2} \cdot \bar{x} = 0,02 \cdot 1,4977 = 0,03 \mu m \quad (6)$$

Standartní nejistota  $u_B$ :

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = \sqrt{0,0173^2 + 0,03^2} = 0,0346 \mu m \quad (7)$$

**Výpočet kombinované nejistoty  $u_c$**

$$u_c = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)} = \sqrt{(0,0533^2 + 0,0346^2)} = 0,0774 \mu m \quad (8)$$

**Výpočet rozšířené nejistoty  $U$**

$$U = k_u \cdot u_c = 2 \cdot 0,0774 = 0,155 \mu m \quad (9)$$

Kde:

$k_u$ ... koeficient rozšíření – Stanoven pro pravděpodobnost pokrytí 95 % -  $k_u = 2$

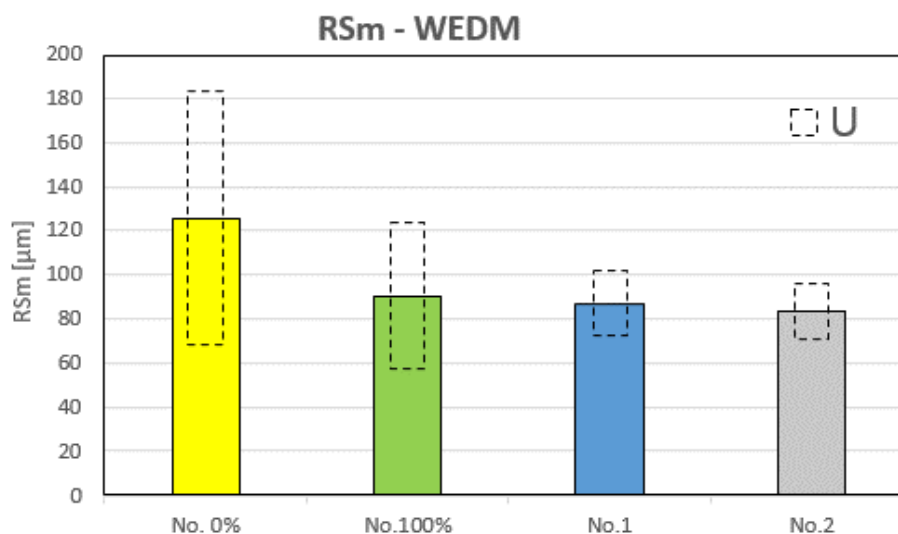
**Zápis výsledku**

$$Ra = 1,498 \pm 0,0155 \mu m \quad (10)$$

#### 4.5 Analýza kvality povrchu po WEDM

Způsobem, jakým byl proveden vzorový výpočet byly zpracovány všechny získané hodnoty parametrů pro každý typ vzorků. Výsledky tohoto zpracování byly dále zapracovány do tabulek viz příloha B. Na základě těchto tabulek byly vytvořeny následující porovnávací grafy

#### 4.5.1 Porovnání drsnosti dle parametru RSm

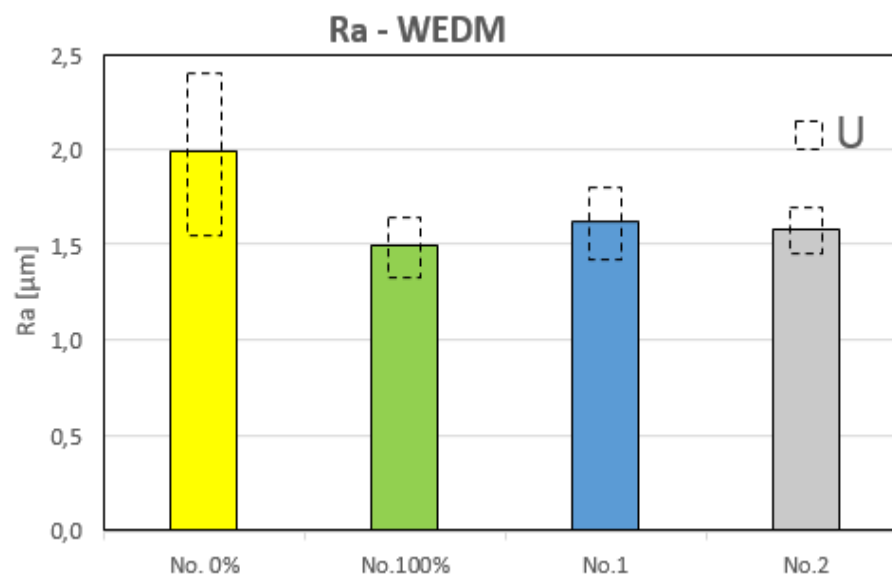


Obrázek 4.10 - Grafické porovnání dle parametru RSm po WEDM

Z grafu na obrázku 4.10 je možné vidět průměrné hodnoty parametru RSm včetně nejistot u jednotlivých typů vzorků. Z tohoto grafu je patrné, že nejvyšší hodnoty tohoto parametru dosáhly vzorky typu No. 0 %. Ovšem u tohoto strukturního typu je také vyšší rozšířená nejistota měření, která je zapříčiněna rozdílem hodnot sledovaného parametru na jednotlivých snímcích. Z této skutečnosti je možné odhadovat, že plochy vzorků No. 0 % byly po 3D tisku rozměrově nepřesné a hrubé. Právě tyto nedostatky při obrábění metodou WEDM způsobí změnu rychlosti řezání a změnu vzdálenosti mezi obrobkem a nástrojem. Tyto změny vedou právě k rozdílné kvalitě povrchu na různých místech. Kromě již zmíněných nepřesností může být vysoká celková nejistota ovlivněna také neparnými deformacemi, které vznikaly uvolňováním vnitřního napětí ve funkčních částech vzorků.

Dle parametru RSm je pro dosažení povrchu s nejstabilnější drsností vhodný vzorek typu No. 2 a to z důvodu nejnižší hodnoty rozšířené nejistoty, která reflektuje rozdíly mezi naměřenými hodnotami.

#### 4.5.2 Porovnání drsnosti dle parametru Ra

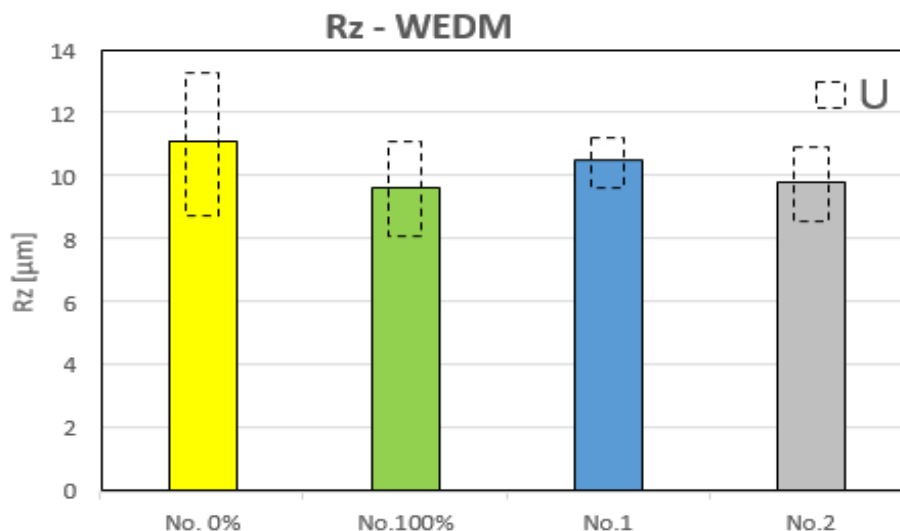


Obrázek 4.11 - Grafické porovnání dle parametru Ra po WEDM

Na obrázku 4.11 je znázorněn graf, ze kterého je patrné, že vzorky typu No. 0 % dosahují nejvyšších hodnot parametru Ra. Také je zde vidět poměrně vysoká rozšířená nejistota měření, která poukazuje na rozdílnost kvality povrchu na různých místech vzorků tohoto typu. Tyto rozdíly je možné opět přisuzovat rozměrové nepřesnosti vzorků před obráběním a deformacím zapříčiněným uvolňováním vnitřního napětí při obrábění.

Dle parametru Ra jsou pro dosažení povrchu s nejstabilnější drsností vhodné vzorky typu No. 100 % a No. 2. U vzorků No. 100 % je sice nepatrně vyšší celková nejistota, způsobená různorodostí naměřených hodnot, ale v celkovém součtu vykazují vzorky typu No. 100 % nižších hodnot parametru Ra.

#### 4.5.3 Porovnání drsnosti dle parametru Rz



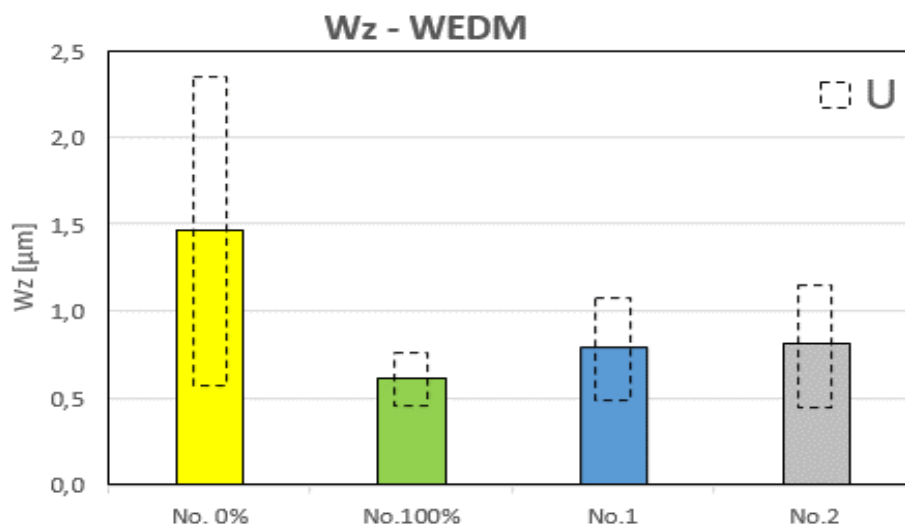
Obrázek 4.12 - Grafické porovnání dle parametru Rz po WEDM

Z grafu patrného na obrázku 4.12 je vidět, že vzorky typu No. 0 % dosahují nejvyšších hodnot parametru Rz. Také je u těchto vzorků nejvyšší rozšířená nejistota, která nasvědčuje velkým rozdílům mezi kvalitou povrchu na jednotlivých místech vzorků. Tyto rozdíly jsou s velkou pravděpodobností zapříčiněny rozměrovou nepřesností a deformacemi spojenými s uvolňováním vnitřního napětí.

Nejnižší hodnoty parametru Rz dosahují vzorky typu No. 100 % a No. 2. Vzorky typu No. 1 dosahují vyšších hodnot parametru Rz, ale na druhou stranu vykazují nejmenší rozdíly v kvalitě povrchu mezi jednotlivými místy na vzorcích.



#### 4.5.4 Porovnání vlnitosti dle parametru $W_z$

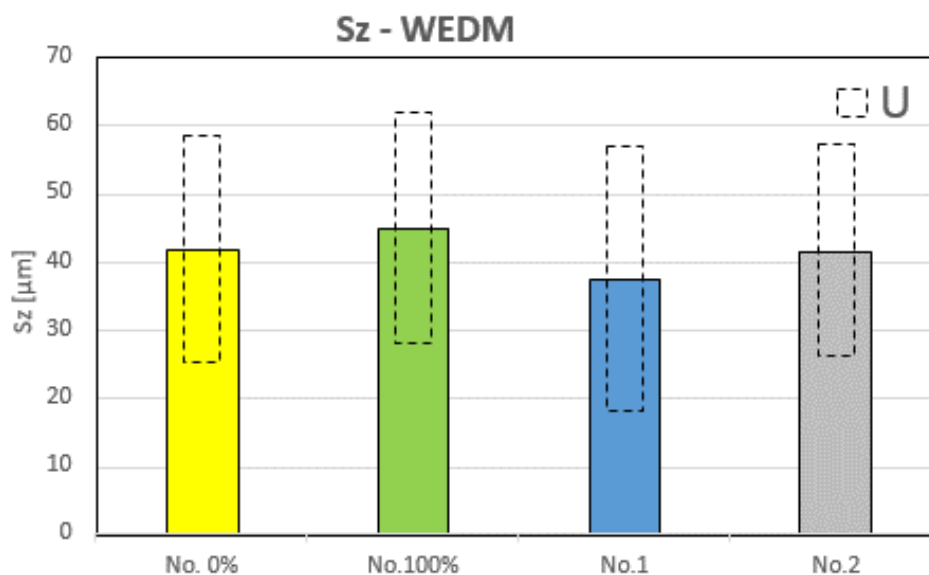


Obrázek 4.13 - Grafické porovnání dle parametru  $W_z$  po WEDM

Na obrázku 4.13 je možné vidět graf, který porovnává jednotlivé druhy vzorků na základě parametru vlnitosti  $W_z$ . Z tohoto grafu je zřejmé, že vzorky typu No. 0 % vykazují nejvyšší hodnoty tohoto parametru s poměrně vysokou rozšířenou nejistotou. Velikost této nejistoty nasvědčuje velkým rozdílům vlnitosti mezi snímanými místy. Právě tato nejistota ukazuje, že vzorky No. 0 % vykazovaly před obráběním velké nepřesnosti, nebo velkou míru vnitřního napětí, které se během obrábění uvolňovalo a docházelo tak k deformacím a následné změně hloubky řezu.

Nejmenší hodnoty parametru vlnitost  $W_z$  dosahovaly vzorky typu No. 100 %, u kterých je i dle rozšířené nejistoty nejmenší rozdíl vlnitosti mezi snímanými místy.

#### 4.5.5 Porovnání drsnosti dle parametru Sz

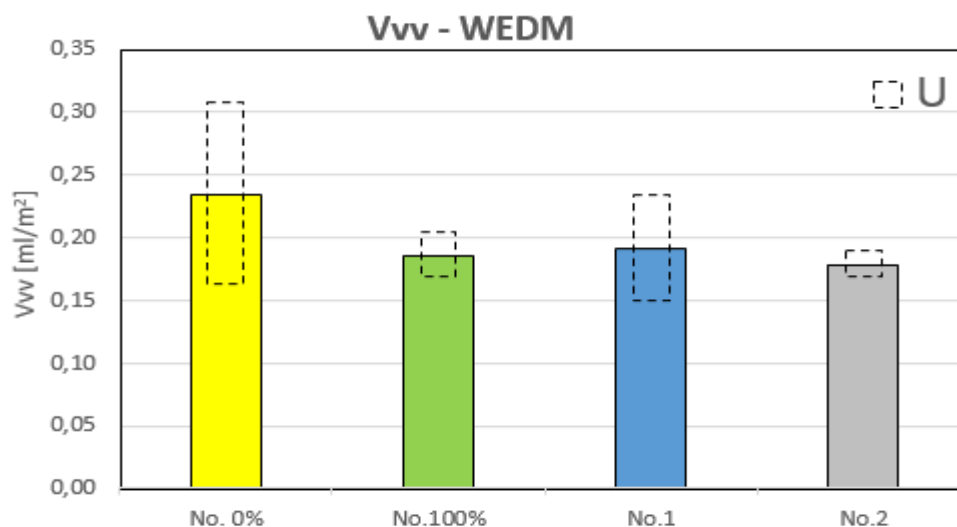


Obrázek 4.14 - Grafické porovnání dle parametru Sz po WEDM

Z grafu na obrázku 4.14 patrné, že podle plošného parametru drsnosti Sz vychází nejhůře vzorky typu No. 100 %. Dále je možné vidět, že mezi vzorky typu No. 0 % a No. 2 je jen velmi nepatrný rozdíl v jejich drsnosti. Rozšířená nejistota je až na vzorky typu No. 1 prakticky stejná u všech typů vzorků. Z tohoto faktu je možné usuzovat, že dle plošného parametru drsnosti Sz byly mezi vzorky typu No. 0 %, No. 100 % a No. 2 velmi malé odlišnosti v rozměrové přesnosti a míře vnitřního napětí.

Nejnižších hodnot plošné drsnosti dle parametru Sz dosahují vzorky typu No. 1 a to i přes poměrně velkou celkovou nejistotu.

#### 4.5.6 Porovnání drsnosti dle parametru $V_{vv}$

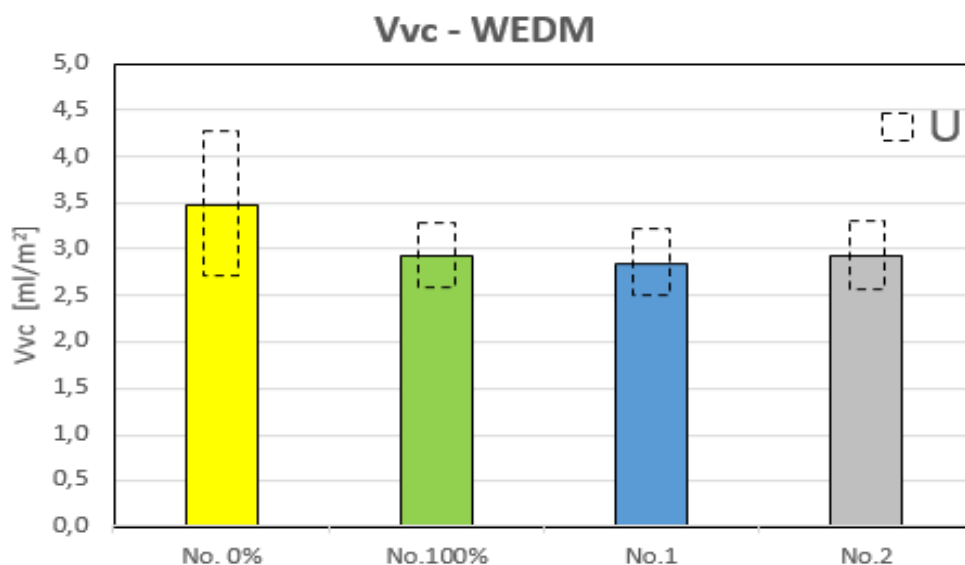


Obrázek 4.15 - Grafické porovnání dle parametru  $V_{vv}$  po WEDM

Na obrázku 4.15 je možné vidět grafické porovnání jednotlivých typů vzorků podle objemového parametru plošné drsnosti  $V_{vv}$ . Z tohoto grafu je patrné, že vzorky typu No. 0 % vykazují nejvyšší objem prohlubní pod materiálovým jádrem. U tohoto typu vzorků je také možno vidět nejvyšší celkovou nejistotu, která poukazuje na fakt, že vzorky typu No. 0 % před obráběním byly nepřesné a v místech výstupků docházelo k intenzivnějšímu úběru materiálu a tím i k tvorbě větších kráterů. Dále je také možné usuzovat že v těchto vzorcích zůstaly i po obrobení póry.

Dle parametru  $V_{vv}$  se jeví jako nejlepší vzorky typu No. 2, jelikož vykazují nejnižší průměrnou hodnotu tohoto parametru. I rozšířená nejistota je u těchto vzorků nejnižší, takže lze předpokládat, že se kvalita povrchu těchto vzorků nebude výrazně měnit na různých místech.

#### 4.5.7 Porovnání drsnosti dle parametru $V_{vc}$

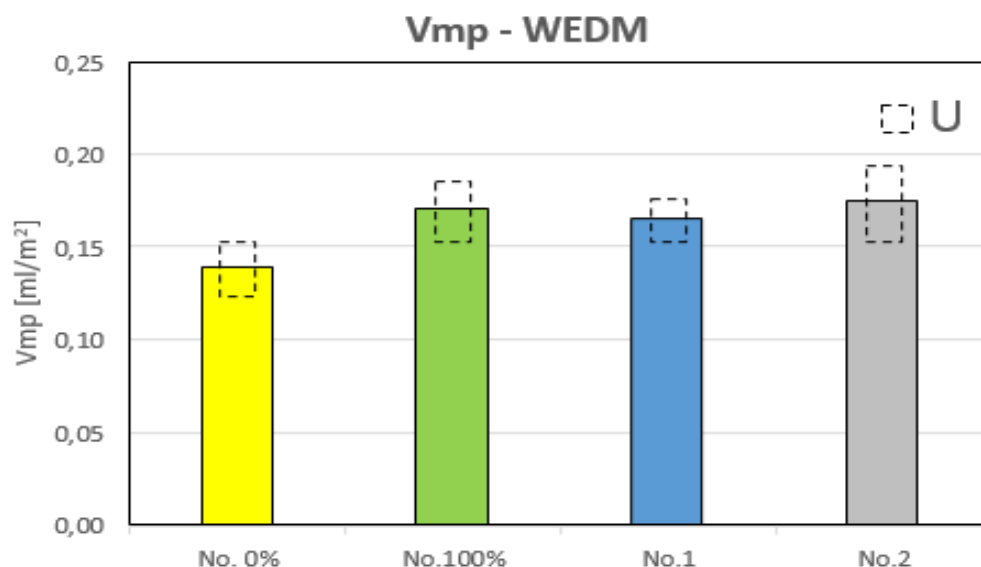


Obrázek 4.16 - Grafické porovnání dle parametru  $V_{vc}$  po WEDM

Z grafu na obrázku 4.16 je možné vidět porovnání jednotlivých typů vzorků podle objemového parametru plošné drsnosti  $V_{vc}$ . Tento parametr reprezentuje objem prohlubní v materiálovém jádru. Z tohoto grafu je patrné, že vzorky typu No. 0 % vykazují ze všech typů vzorků nejvyšší hodnoty tohoto parametru a také nejvyšší nejistotu. Tuto skutečnost je opět možné přisuzovat velké rozměrové nepřesnosti zkoumaných vzorků v kombinaci s deformacemi vlivem uvolňování vnitřních napětí.

Z ostatních typů vzorků vykazují nejnižší objem prohlubní v materiálovém jádru vzorky typu No. 1. Tento rozdíl i velikost nejistoty je ovšem oproti vzorkům No. 100 % a No. 2 velmi nepatrný.

#### 4.5.8 Porovnání drsnosti dle parametru $V_{mp}$



Obrázek 4.17 - Grafické porovnání dle parametru  $V_{mp}$  po WEDM

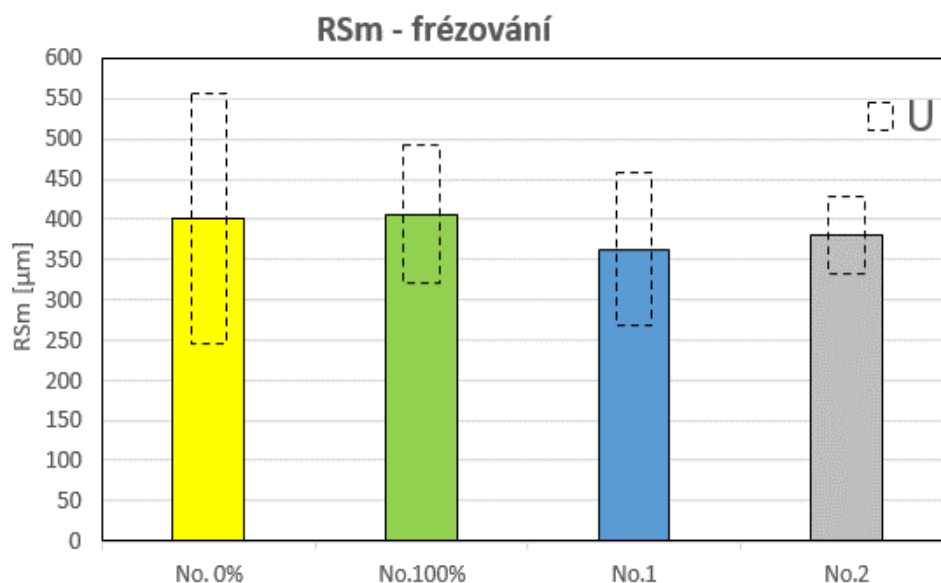
Obrázek 4.17 představuje grafické porovnání jednotlivých typů vzorků podle objemového parametru plošné drsnosti  $V_{mp}$ , který reprezentuje objem vrcholů nad materiálovým jádrem. Největších hodnot parametru  $V_{mp}$  dosahují vzorky typu No. 2. V porovnání se vzorky No. 100 % a No. 1 se ovšem nejedná o velké rozdíly. Z této trojice vychází ovšem nejlépe vzorky No. 1, které vykazují nejmenší rozšířenou nejistotu, a tedy větší pravděpodobnost dosažení stejnorodého povrchu.

Nejnižších hodnot tohoto parametru dosahovaly vzorky typu No. 100 %. Tuto skutečnost je možné na základě výsledku parametrů  $V_{vv}$  a  $V_{vc}$ , přisuzovat právě většímu objemu kráterů, které se překrývaly a díky tomu došlo ve větší míře k odstranění výstupků.

## 4.6 Analýza kvality povrchu po frézování

Stejným způsobem, jakým byly zpracované naměřené hodnoty parametrů po obrábění metodou WEDM byly zpracovány i hodnoty získané z frézovaných vzorků. Tyto hodnoty byly opět zpracovány do tabulek v příloze B. Z těchto zpracovaných hodnot byly následně vytvořeny i následující porovnávací grafy.

### 4.6.1 Porovnání drsnosti dle parametru RSm

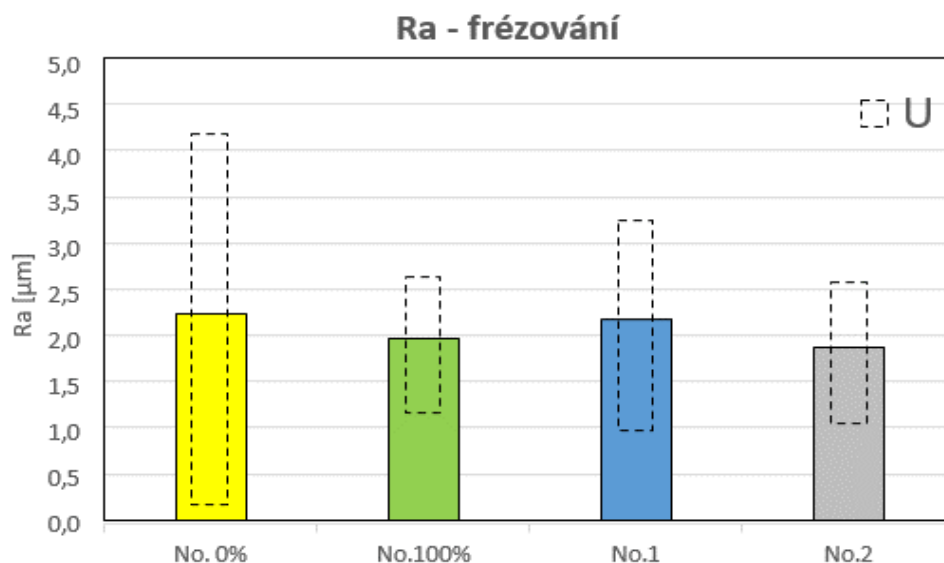


Obrázek 4.18 - Grafické porovnání dle parametru RSm po frézování

Z grafu na obrázku 4.18 je možné vidět průměrné hodnoty parametrů RSm včetně nejistot u jednotlivých typů vzorků. Z tohoto grafu je patrné, že vzorky typu No. 0 % vykazují nevyšší hodnoty rozšířené nejistoty. Velikost této nejistoty je způsobena rozdílem hodnot tohoto parametru na jednotlivých snímcích. Z této skutečnosti je možné určit, že plochy vzorků No. 0 % byly po frézování ve snímaných místech nedokonale obrobené. Tuto skutečnost je možné přisuzovat nízké tuhosti a rozměrové nepřesnosti vzorků této struktury. Kromě těchto vlivů mohlo také dojít k deformacím vlivem uvolňování vnitřních napětí.

Dle parametru RSm je pro dosažení povrchu s nejstabilnější drsností vhodný vzorek typu No. 2 a to z důvodu nejnižší hodnoty rozšířené nejistoty, která reflektuje rozdíly v drsnosti povrchu mezi snímanými místy na vzorcích.

#### 4.6.2 Porovnání drsnosti dle parametru Ra

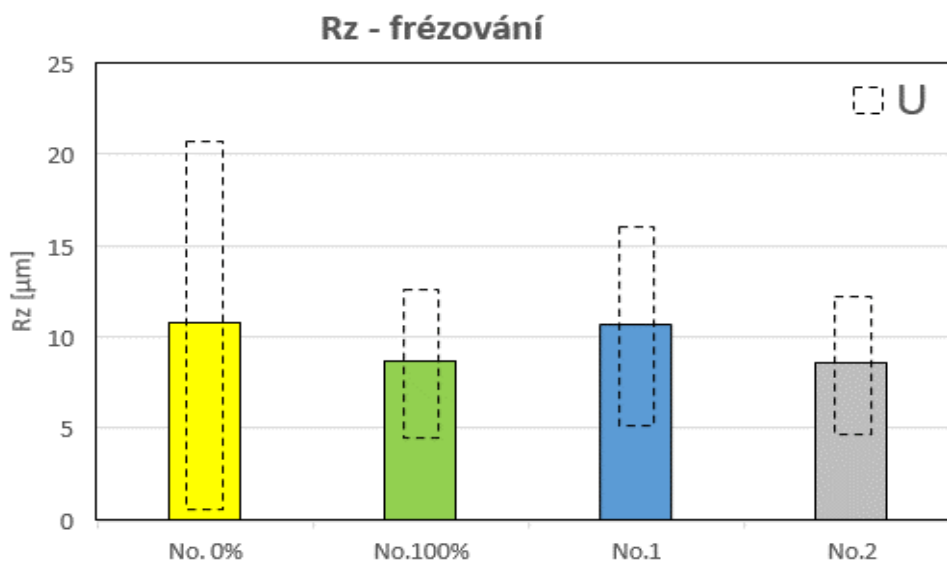


Obrázek 4.19 - Grafické porovnání dle parametru Ra po frézování

Na obrázku 4.19 je znázorněno grafické porovnání jednotlivých typů vzorku podle dosažených hodnot profilového parametru drsnosti Ra. Z tohoto grafu je možné vypožorovat, že vzorky typu No. 0 % vykazují velmi velkou rozšířenou nejistotu. Velikost této nejistoty je způsobena opět odlišnými hodnotami parametru Ra na jednotlivých snímcích. Tuto odlišnost lze přisuzovat zejména nízké tuhosti vzorku, kvůli které docházelo k ohybu funkční části a boční plochy nebyly ve stanoveném místě dokonale obrobena

Dle parametru Ra jsou pro dosažení povrchu s nejstabilnější drsností vhodné vzorky typu No. 2 a No. 100 %.

#### 4.6.3 Porovnání drsnosti dle parametru Rz



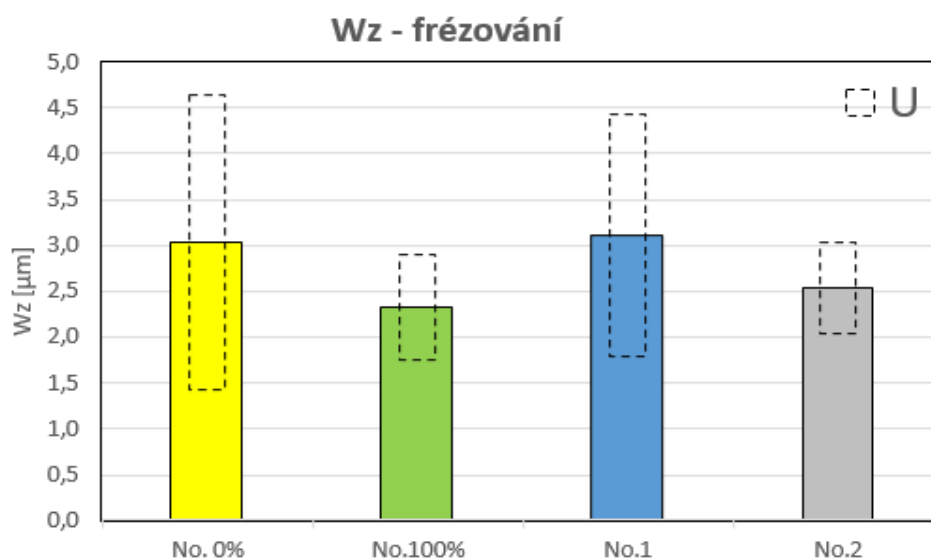
Obrázek 4.20 - Grafické porovnání dle parametru Rz po frézování

Z grafu na obrázku 4.20 je vidět, že dle profilového parametru Rz dosahují nejvyšších průměrných hodnot tohoto parametru vzorky typu No. 0 % a No. 1. U vzorků typu No. 0 % je ovšem vidět velmi velká rozšířená nejistota, která nasvědčuje vysokému rozdílu hodnot tohoto parametru mezi jednotlivými snímanými místy. Příčiny tohoto rozdílu je možné přisuzovat stejným faktorům, jako u parametru Ra, tedy rozměrové nepřesnosti, nízké tuhosti a vysokému vnitřnímu napětí ve vzorcích tohoto typu.

Dle parametru Rz jsou pro dosažení povrchu s nejnižší a nejstabilnější drsností vhodné vzorky typu No. 2 a No. 100 %.



#### 4.6.4 Porovnání vlnitosti dle parametru $W_z$

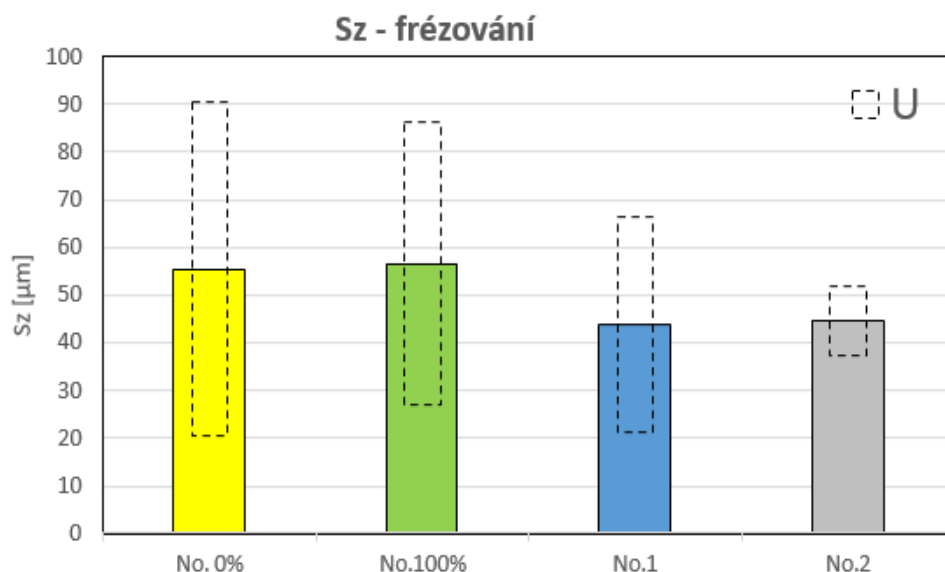


Obrázek 4.21 - Grafické porovnání dle parametru  $W_z$  po frézování

Na obrázku 4.21 je znázorněn graf, který porovnává jednotlivé typy vzorků na základě profilového parametru vlnitosti  $W_z$ . Z tohoto grafu je možné usuzovat, že vzorky se strukturou No. 1 a No. 0 % dosahují nejvyšších hodnot tohoto parametru a zároveň nejvyšších nejistot, které poukazují na rozdílnou velikost tohoto parametru na jednotlivých místech na vzorcích. Tyto odchylky naznačují, že rozdíly ve vlnitosti na jednotlivých místech byly zapříčiněny především vibracemi, které vznikaly díky nedostatečné tuhosti těchto typů vzorků. Rozdílnost v naměřených hodnotách mohla být také způsobena vyšším vnitřním napětím v těchto typech vzorků, které se při obrábění uvolňovalo a způsobovalo deformace.

Z grafu je dále patrné, že vzorky typu No. 100 % vykazují nejnižší vlnitost povrchu i přes nepatrně vyšší rozšířenou nejistotu oproti vzorkům typu No. 2.

#### 4.6.5 Porovnání drsnosti dle parametru Sz

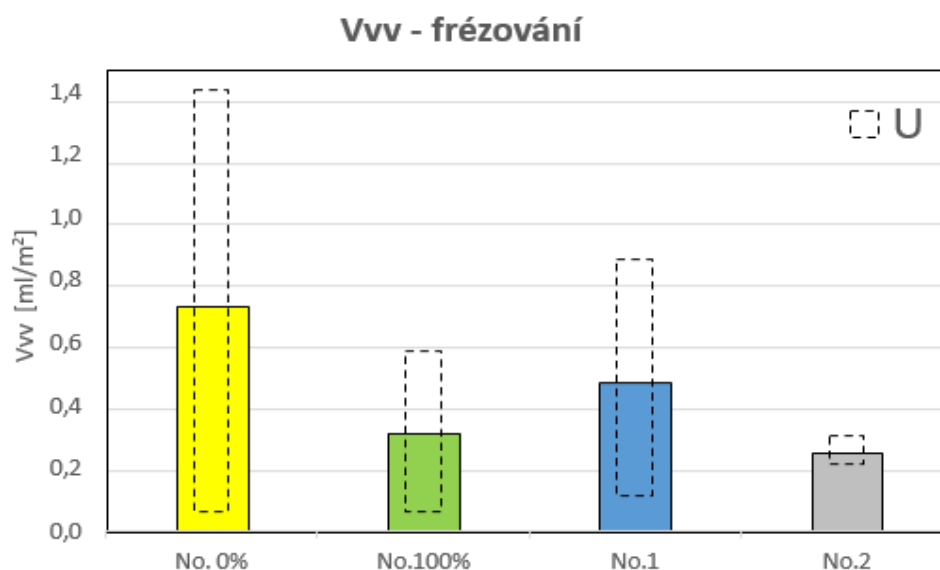


Obrázek 4.22 - Grafické porovnání dle parametru Sz po frézování

Z grafu obrázku 4.22 je patrné porovnání jednotlivých typů vzorků podle plošného parametru drsnosti Sz. Z tohoto grafu je vidět poměrně velká rozšířená nejistota u vzorků typu No. 0 % a No. 100 %, která naznačuje velký rozdíl parametru Sz na jednotlivých snímcích. Jelikož z předchozích srovnání je patrné, že vzorky No. 0 % a No. 100 mají rozdílnou tuhost lze tento rozdíl hodnot přisuzovat rozměrové nepřesnosti nebo vysoké míře vnitřního napětí v těchto typech vzorků.

Na základě parametru plošné drsnosti Sz je možné konstatovat, že stejnorodý povrch bez větších rozdílů drsnosti na jednotlivých místech mají po frézování vzorky typu No. 2.

#### 4.6.6 Porovnání drsnosti dle parametru $V_{vv}$

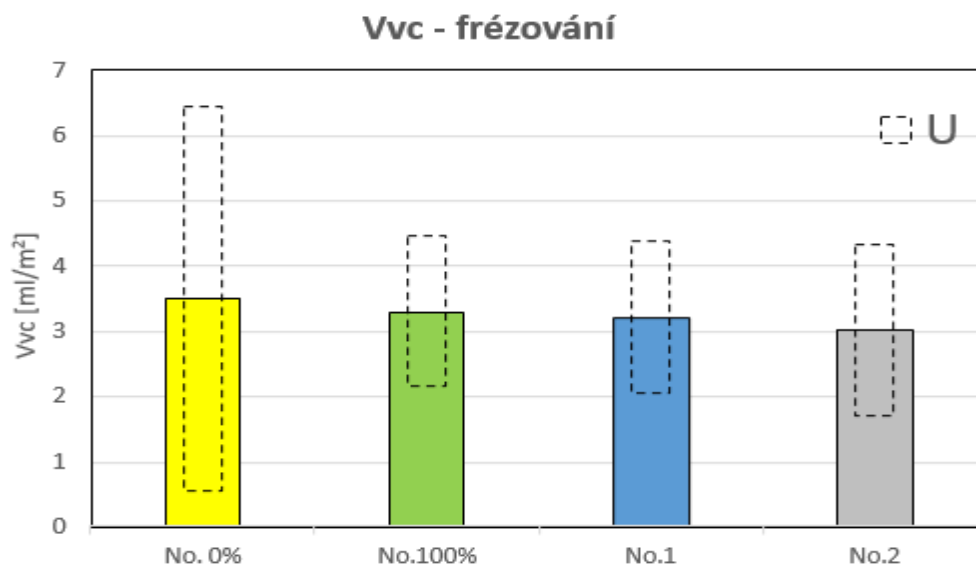


Obrázek 4.23 - Grafické porovnání dle parametru  $V_{vv}$  po frézování

Na obrázku 4.23 je možné vidět grafické porovnání jednotlivých typů vzorků podle objemového parametru plošné drsnosti  $V_{vv}$ . Z tohoto grafu je patrné, že vzorky typu No. 0 % vykazují nejvyšší objem prohlubní pod materiálovým jádrem. U tohoto typu vzorků je také možno vidět největší celkovou nejistotu, která nasvědčuje nedokonalému obrobení vlivem rozměrové nepřesnosti, ale také nízké tuhosti vzorku tohoto typu. Díky nízké tuhosti se vzorky typu No. 0 % a No. 1 nejvíce ohýbaly, což zapříčinilo právě nedokonalé obrobení a neobrobená místa tvořila prohlubně pod materiálovým jádrem. Dále je také možné usuzovat že v těchto vzorcích zůstaly i po obrobení póry.

Dle parametru  $V_{vv}$  vykazují nejnižší objem prohlubní pod materiálovým jádrem vzorky No. 2, jejichž průměrná hodnota vykazuje nejnižší rozšířenou nejistotu, což nasvědčuje povrchu se stejnými vlastnostmi v celé své ploše.

#### 4.6.7 Porovnání drsnosti dle parametru $V_{vc}$

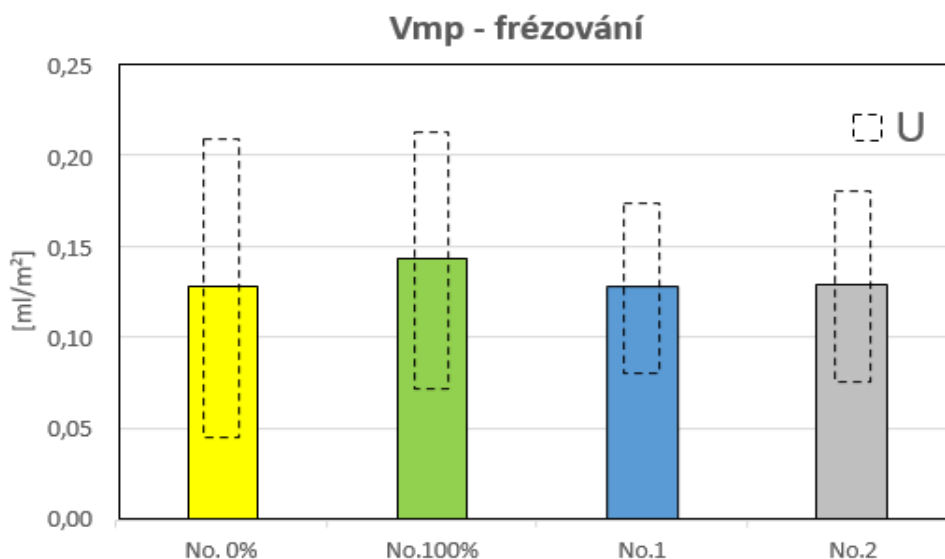


Obrázek 4.24 - Grafické porovnání dle parametru  $V_{vc}$  po frézování

Na obrázku 4.24 je graf, který porovnává jednotlivé typy vzorků na základě parametru  $V_{vc}$ , který určuje objem prohlubní v materiálovém jádru. Z tohoto grafu je opět patrná vysoká rozšířená nejistota u vzorků No. 0 % což nasvědčuje různému objemu prohlubní na jednotlivých snímaných místech. Důvody této skutečnosti jsou stejné jako u parametru  $V_{vv}$ , tedy nedokonalé obrobení vlivem nízké tuhosti, nepřesných výchozích rozměrů a deformací zapříčiněných uvolňováním vnitřního napětí. Dále je možné rozdílné hodnoty tohoto parametru přisuzovat existenci pórů v některých snímaných místech.

Nejnižšího objemu prohlubní v materiálovém jádru i přes vyšší nejistotu dosahují vzorky typu No. 2.

#### 4.6.8 Porovnání drsnosti dle parametru $V_{mp}$



Obrázek 4.25 - Grafické porovnání dle parametru  $V_{mp}$  po frézování

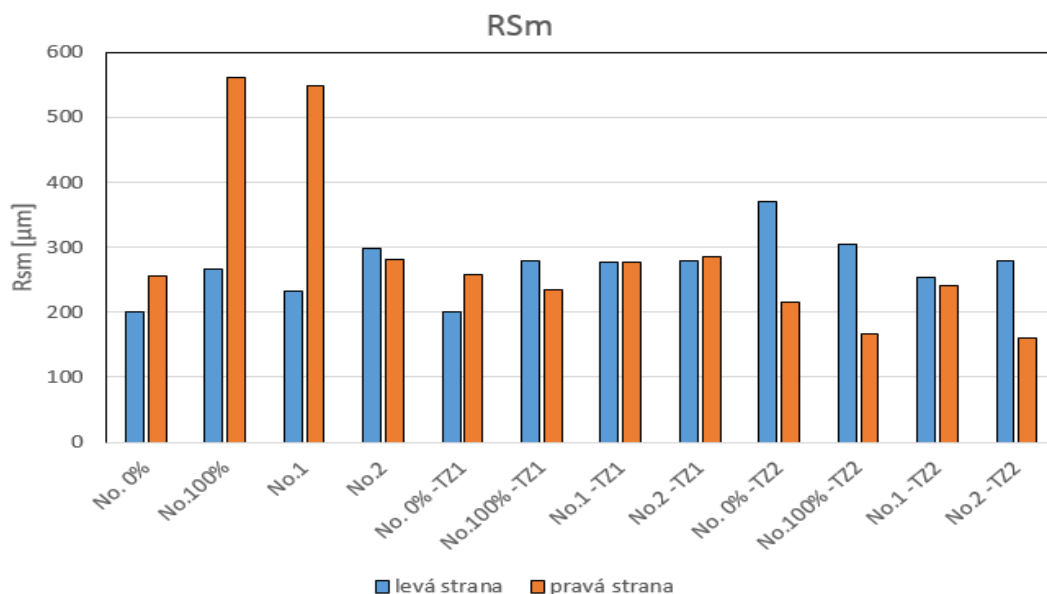
Na obrázku 4.25 je možné vidět grafické porovnání jednotlivých typů vzorků podle objemového parametru plošné drsnosti  $V_{mp}$ , který reprezentuje objem výstupků nad materiálovým jádrem. Z tohoto grafu je patrné, že nejvyšších průměrných hodnot i nejistot dosahují vzorky typu No. 100 % a No. 0 % a to s malými rozdíly mezi sebou.

Na základě tohoto grafu je možné dále usuzovat že objem výstupků nad materiálovým jádrem je nejstabilnější u vzorků No. 1.

#### 4.7 Porovnání rozdílu mezi levou a pravou stranou vzorku

Jelikož se jedná jen o orientační porovnání rozdílu kvality povrchu na jednotlivých stranách vzorku byl na každé straně vzorku proveden vždy jeden snímek. Výsledné hodnoty parametrů tedy nebylo třeba statisticky zpracovávat. Pro naměřené hodnoty byla vypočtena pouze standardní nejistota typu B, jejíž hodnoty byly poměrně malé a neovlivňovaly zjištěné rozdíly, dále by vyznačení těchto nejistot u jednotlivých sloupců vzhledem k jejich velikosti činilo grafy nepřehledné. V následujících podkapitolách je tedy provedeno grafické srovnání hodnot získaných přímo z vyhodnocení snímků. Veškeré naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze B.

#### 4.7.1 Porovnání drsnosti dle parametru RSm

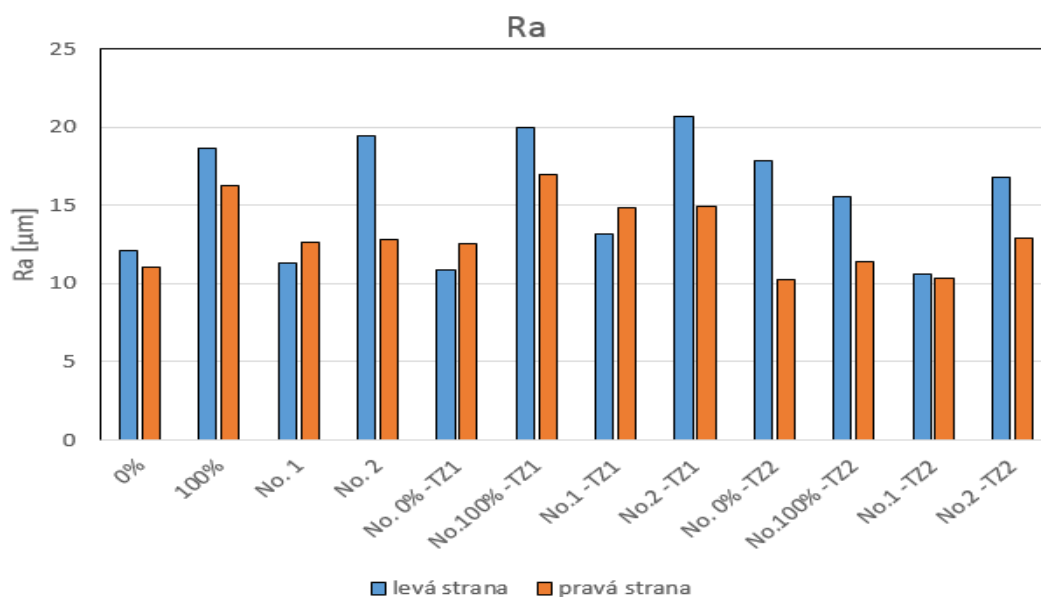


Obrázek 4.26 - Grafické porovnání jednotlivých stran dle parametru RSm

Na obrázku 4.26 je možné vidět graf který porovnává rozdíly parametru RSm na jednotlivých stranách u jednotlivých typů vzorku. Z tohoto grafu je vidět, že nejvyššího rozdílu mezi levou a pravou stranou dosahují tepelně nezpracované vzorky No. 100 % a No. 1. U těchto typů vzorků společně s tepelně nezpracovanými vzorky typu No. 0 % je dále vidět že pravá strana těchto typů vzorků vykazuje horší kvalitu povrchu. Nepatrný rozdíl tohoto parametru je také vidět u vzorku No. 2 po tepelném zpracování 1, kdy opět pravá strana vykazuje vyšší hodnotu parametru RSm. Výraznější rozdíly v kvalitě povrchu mezi levou a pravou stranou je možné vidět také u vzorků typu No. 0 %, No. 100 % a No. 2 po tepelném zpracování 2. U těchto vzorků dosahuje vyšších hodnot parametru RSm vždy levá strana.

Nejmenších rozdílů hodnot parametru RSm mezi levou a pravou stranou je možné pozorovat u vzorku typu No. 1 po tepelném zpracování 1, kde je rozdíl velmi malý. Dále se hodnoty parametru RSm na jednotlivých stranách nejméně liší u vzorku typu No. 2 po tepelném zpracování 1, a u vzorku typu No. 1 po tepelném zpracování 2.

#### 4.7.2 Porovnání drsnosti dle parametru Ra

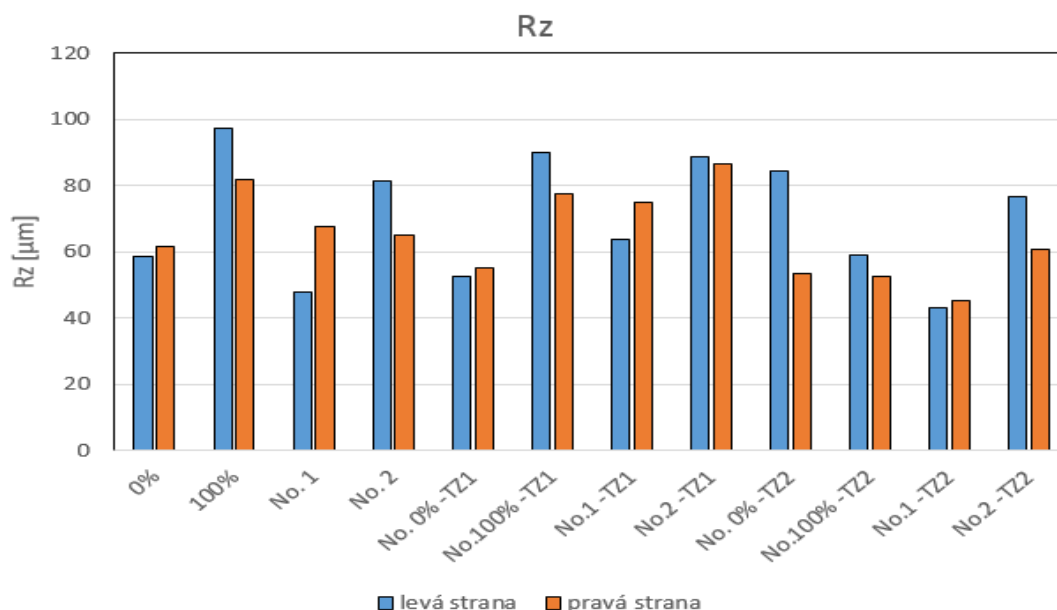


Obrázek 4.27 - Grafické porovnání jednotlivých stran dle parametru Ra

Obrázek 4.27 znázorňuje grafické porovnání rozdílů hodnot parametru Ra mezi levou a pravou stranou jednotlivých typů vzorků. Z tohoto grafu je patrné, že až na vzorky typu No. 0 a No. 1 po tepelném zpracování včetně vzorku typu No. 1 bez tepelného zpracování dosahují horších hodnot parametru Ra vždy levé strany vzorků. Nejvyšší rozdíly mezi jednotlivými stranami jsou patrné u tepelně nezpracovaného vzorku typu No. 2 a vzorku typu No. 0 % po tepelném zpracování 2.

Nejmenší rozdíl mezi levou a pravou stranou vykazuje vzorek typu No. 1 po tepelném zpracování 2. Dále jsou patrné malé rozdíly také u tepelně nezpracovaných vzorků No. 0 %, No. 1 a u vzorků typu No. 0 %, No. 1 po tepelném zpracování 1.

### 4.7.3 Porovnání drsnosti dle parametru Rz



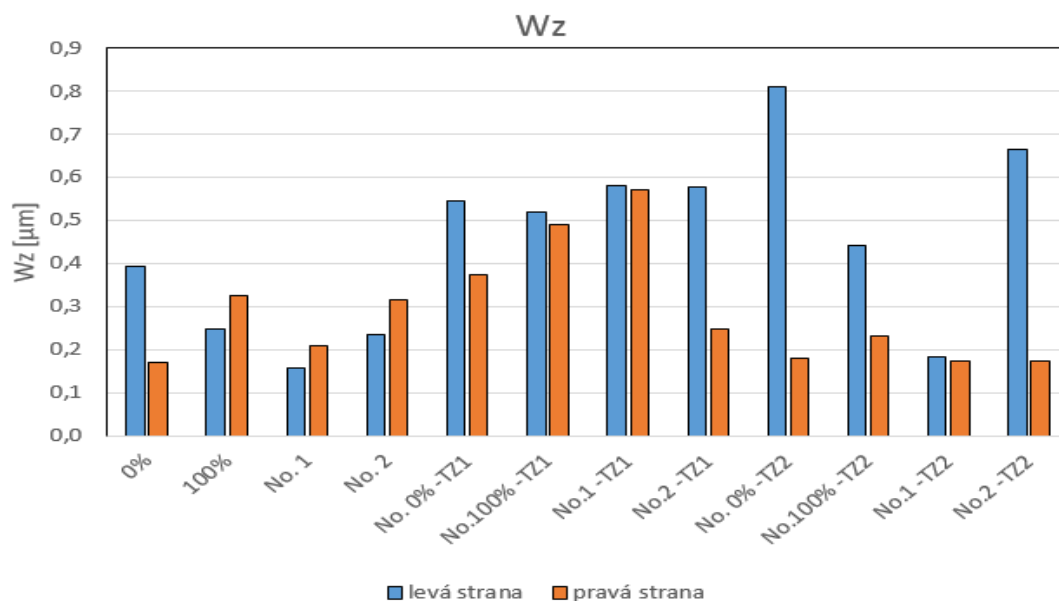
Obrázek 4.28 - Grafické porovnání jednotlivých stran dle parametru Rz

Na obrázku 4.28 je možné vidět graf, který porovnává drsnost povrchu levé a pravé strany na jednotlivých typech vzorků podle parametru Rz. Z tohoto grafu je možné určit, že nejvyšší rozdíl mezi stranami žebra vykazuje vzorek typu No. 0 % po tepelném zpracování 2. Dále je z tohoto grafu patrné, že rozdíly mezi stranami jsou u většiny ostatních typů vzorků až na výjimky podobné.

Nejmenší rozdíl mezi levou a pravou stranou lze pozorovat u vzorku typu No. 1 po tepelném zpracování 2. Dále pak podobných hodnot malého rozdílu dosahuje také vzorek typu No. 0 % a to jak tepelně nezpracovaný, tak i po tepelném zpracování 1.



#### 4.7.4 Porovnání vlnitosti dle parametru $W_z$

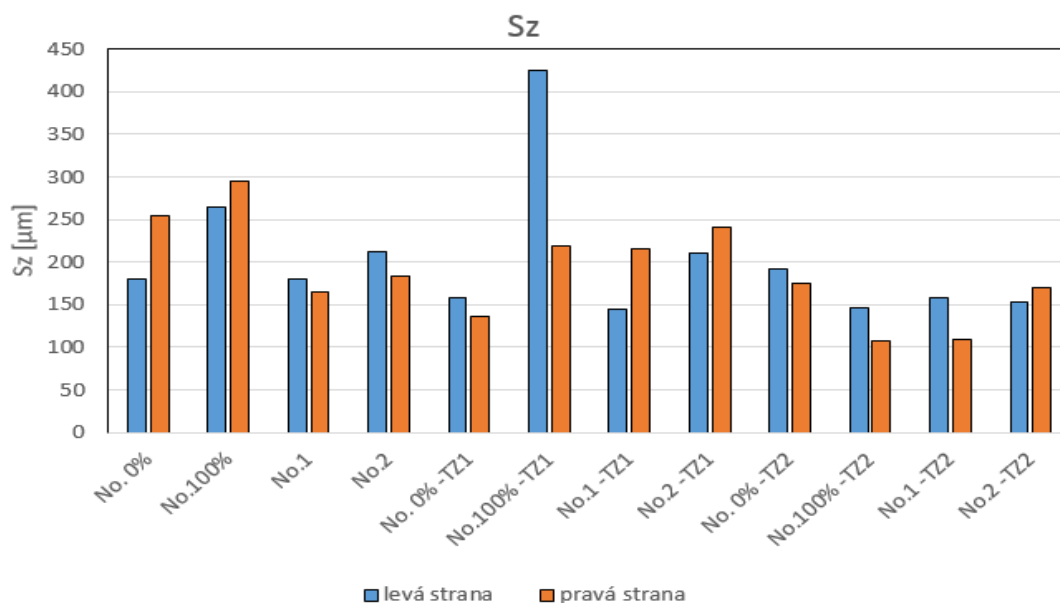


Obrázek 4.29 - Grafické porovnání jednotlivých stran dle parametru  $W_z$

Z grafu na obrázku 4.29 lze vidět porovnání vlnitosti jednotlivých stran vzorků dle parametru  $W_z$ . Z tohoto grafu je patrné, že nejvyšší rozdíl ve vlnitosti levé a pravé strany vykazují vzorky po tepelném zpracování 2 a to vzorky typu No. 0 % a No. 2. Dále je u těchto vzorků patrné, že levá strana dosahuje vyšších hodnot vlnitosti než strana pravá. Tato skutečnost je dále také patrná u tepelně nezpracovaného vzorku typu No. 0 %, dále u vzorku typu No. 0 % po tepelném zpracování 1 a u vzorku typu No. 100 % po tepelném zpracování 2.

Z tohoto grafu je možné dále vypožorovat, že nejmenší rozdíly ve vlnitosti jednotlivých stran vykazuje vzorek typu No. 1 po tepelném zpracování 1 společně se vzorkem typu No. 1 po tepelném zpracování 2. U vzorku typu No. 1 po tepelném zpracování 2 lze také vypožorovat nejnižší souměrné hodnoty parametru  $W_z$ .

#### 4.7.5 Porovnání drsnosti dle parametru Sz

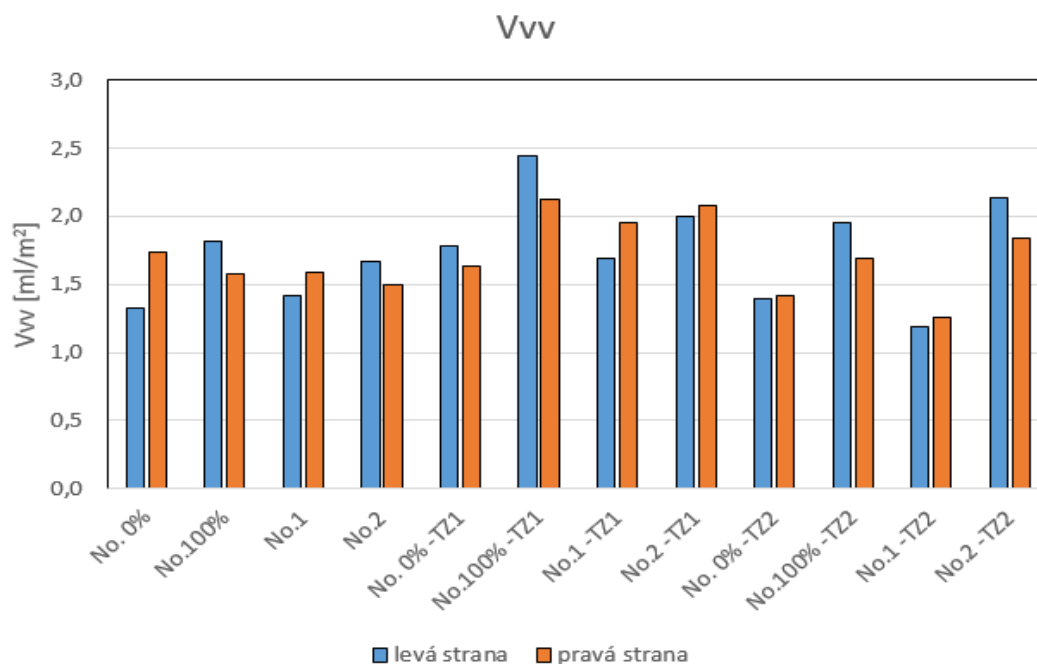


Obrázek 4.30 - Grafické porovnání jednotlivých stran dle parametru Sz

Dle grafického porovnání viditelného na obrázku 4.30 je možné určit, že nejvyšší rozdíl drsnosti mezi levou a pravou stranou dle parametru Sz vykazuje vzorek typu No. 100 % po tepelném zpracování 1. Kromě tohoto vzorku jsou rozdíly v drsnosti jednotlivých stran u všech ostatních vzorků podobné.

Nejmenší rozdíly v drsnosti jednotlivých stran je možné pozorovat u vzorku typu No. 2 po tepelném zpracování 2 a u tepelně nezpracovaného vzorku typu No. 1.

#### 4.7.6 Porovnání drsnosti dle parametru $V_{vv}$

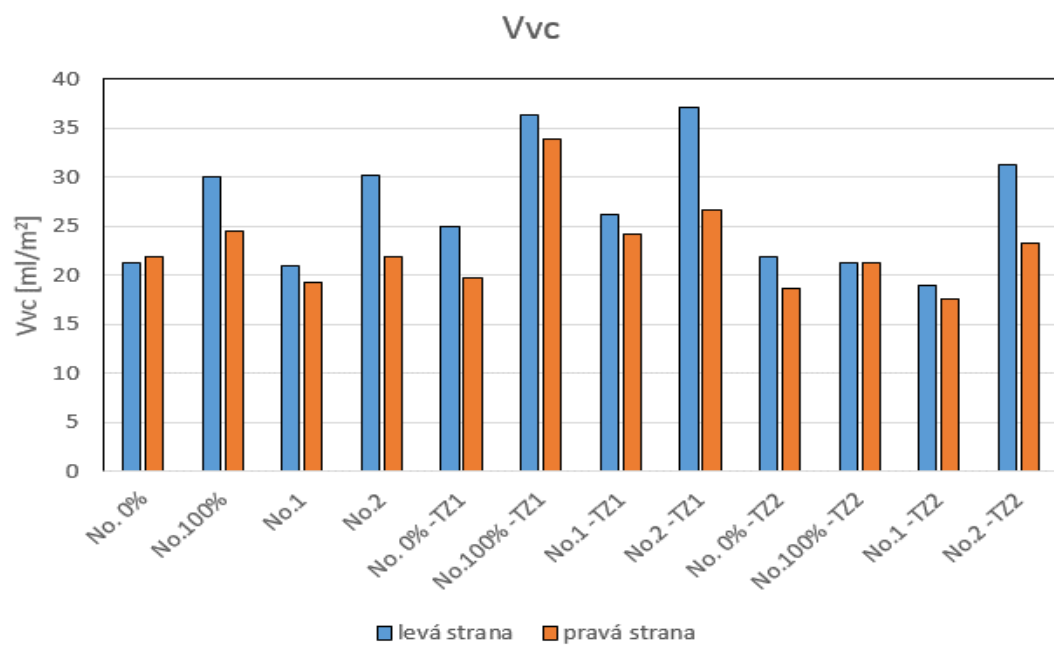


Obrázek 4.31 - Grafické porovnání jednotlivých stran dle parametru  $V_{vv}$

Na obrázku 4.31 je možné vidět graf, který porovnává levou a pravou stranu vzorků dle objemového parametru drsnosti  $V_{vv}$ , který určuje objem prohlubní pod materiálovým jádrem. Jak je vidět rozdíly mezi stranami jednotlivých vzorků jsou až na výjimky podobné. Nejvyšší rozdíly mezi jednotlivými stranami je možné pozorovat u tepelně nezpracovaného vzorku typu No. 0 %

Nejmenších rozdílů hodnot parametru  $V_{vv}$  mezi levou a pravou stranou dosahuje vzorek typu No. 0 po tepelném zpracování 2.

#### 4.7.7 Porovnání drsnosti dle parametru Vvc

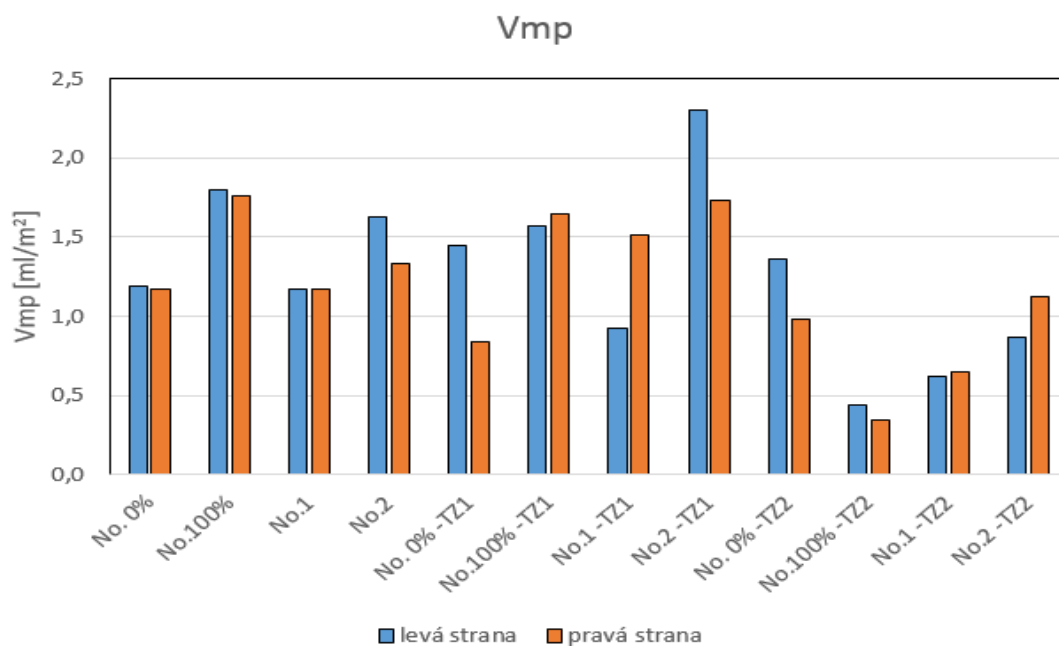


Obrázek 4.32 - Grafické porovnání jednotlivých stran dle parametru Vvc

Graf na obrázku 4.32 porovnává levou a pravou stranu na jednotlivých vzorcích podle objemového parametru Vvc, který charakterizuje objem prohlubní v materiálovém jádru. Z tohoto grafu je možné usuzovat že největší rozdíly v tomto objemu vykazuje vzorek typu No. 2 po tepelném zpracování 1. Z tohoto grafu je dále vidět že u drtivé většiny vzorků vykazuje větší objem prohlubní levá strana.

U vzorku typu No. 100 % po tepelném zpracování 2 lze pozorovat, že tento vzorek nevykazuje prakticky žádný rozdíl drsnosti mezi levou a pravou stranou. Dále je také vidět že minimálního rozdílu objemu prohlubní v materiálovém jádru mezi levou a pravou stranou dosahuje také tepelně nezpracovaný vzorek typu No. 0 %.

#### 4.7.8 Porovnání drsnosti dle parametru $V_{mp}$



Obrázek 4.33 - Grafické porovnání jednotlivých stran dle parametru  $V_{mp}$

Podle grafu na obrázku 4.33 je možné porovnat objem výstupků nad materiálovým jádrem mezi jednotlivými stranami vzorků. Objem výstupků nad materiálovým jádrem určuje parametr  $V_{mp}$ . Dle tohoto parametru vykazují největší rozdíl mezi levou a pravou stranou vzorky po tepelném zpracování 1 a to konkrétně vzorek typu No. 2 a vzorek typu No. 1

Z tohoto porovnání je možné vidět, že nejmenší rozdíly v hodnotách parametru  $V_{mp}$  vykazuje tepelně nezpracovaný vzorek typu No. 1. Kromě toho jsou také nejmenší rozdíly patrné u tepelně nezpracovaných vzorků typu No. 0 % a No. 100 % a u vzorku typu No. 2 po tepelném zpracování 2.

## 5 Závěry pro realizaci v praxi.

Dle většiny parametrů určujících kvalitu povrchu vykazují nejhorší výsledky vzorky typu No. 0 % a to zejména z důvodu velké nejistoty, která je způsobena rozdílem drsnosti a vlnitosti mezi snímanými místy. Jelikož při technologii WEDM nepůsobí na obrobek prakticky žádné síly, lze usuzovat že rozdílná kvalita povrchu na jednotlivých místech je způsobena především rozměrovou nepřesností, případně deformacemi zapříčiněnými uvolňováním vnitřních napětí ve vzorku.

V případě obrábění frézováním se k těmto nedostatkům připojila také nízká tuhost tohoto typu vzorku, která zapříčinila ohyb žebra a následný vznik vibrací. Díky tomu nebyly plochy určené k obrobení rovnoměrně obrobeny, což zapříčinilo zkreslení výsledků. Pro obrábění vzorků typu No. 0 % bych pro dosažení povrchu bez větších rozdílů v kvalitě doporučil v případě obrábění metodou WEDM opakovaný řez. V případě frézování bych doporučil u tohoto typu vzorku především jiný způsob upnutí s podepřením obráběného žebra na protější straně. Jako nelepší vzorky k dosažení nejvyššího povrchu bez lokálních vad za stanovených podmínek obrábění bych doporučil vzorky typu No. 2 a No. 100 %. Ale i v případě těchto vzorků bych navrhoval pro metodu WEDM opakovaný řez a pro obrábění frézováním upnutí s podepřením obráběného žebra.

V případě porovnávání rozdílů v kvalitě povrchu mezi jednotlivými stranami vzorku je patrné, že navržené tepelné zpracování nemá výrazný vliv na velikost tohoto rozdílu. Dále je také možno usuzovat, že tepelné zpracování výrazně neovlivnilo ani drsnost povrchu. Velikost rozdílů v kvalitě povrchu mezi jednotlivými stranami vzorků je dle mého názoru závislá především na konkrétním umístění daného vzorku v procesní komoře 3D tiskárny.

## Závěr

Na začátku této práce byla provedena stručná rešerše zabývající se kvalitou povrchu po aditivní technologii výroby metodou SLM, dále také kvalitou povrchu po obrábění frézováním a metodou WEDM. V této rešerši byly jednotlivé technologie stručně popsány a u každé z nich byly vyjmenovány a popsány základní parametry a časté jevy, které ovlivňují výslednou kvalitu povrchu.

Ve druhé části byl nejprve proveden rámcový popis postupu a důvodů provedení praktické části práce. Po tomto popisu byla nejprve popsána konstrukce vzorku potřebného k měření včetně charakterizace jeho jednotlivých vnitřních struktur a výčtu základních vlastností materiálu 316L. V této části je dále popsána výroba vzorků aditivní technologií včetně schématického znázornění umístění jednotlivých vzorků v procesní komoře 3D tiskárny. Jelikož byly některé z vytištěných vzorků předány ke dvěma rozdílným tepelným zpracováním bylo zde také provedeno tabulkové rozdělení vzorků a dále také uvedeny základní parametry jednotlivých tepelných zpracování. Soubor vzorků bez tepelného zpracování byl určen pro obrobení frézováním a metodou WEDM, proto byl tento soubor navíc rozdělen na dvě poloviny, kdy každá polovina náležela jedné ze dvou technologií obrábění. Následně byl proveden popis postupu provedení jednotlivých technologií obrábění včetně všech problémů, které se při obrábění nebo upínání vyskytly.

Pro umožnění měření parametrů charakterizujících kvalitu byly jednotlivé vzorky naskenovány dle předepsaných zásad pomocí optického mikroskopu Alicona ifinitefocus G5. V případě obráběných vzorků bylo vyhodnocováno vždy šest vybraných snímků pro každý typ vzorků. Tyto získané hodnoty všech sledovaných parametrů byly následně statisticky zpracovány. Na základě výsledků tohoto zpracování byly vytvořeny grafy, které srovnávají kvalitu povrchu jednotlivých typů vzorků na základě zvolených parametrů. Zhotovené grafy byly následně okomentovány a na jejich základě byly vždy určeny nejhorší a nejlepší typy vzorků dle zkoumaného parametru.

V případě neobrobených vzorků po 3D tisku a vzorků po dvou typech tepelného zpracování, byl proveden vždy jeden snímek na každé straně vzorku dle daných zásad. Na základě hodnot jednotlivých parametrů získaných vyhodnocením provedených snímků byl sledován rozdíl kvality povrchu mezi levou a pravou stranou funkční části na jednotlivých vzorcích. Pro přehledné srovnání byly ze získaných hodnot vytvořeny grafy, na jejichž základě bylo porovnání dle zvolených parametrů provedeno.

Ze všech porovnání byly v poslední části práce vyvozeny závěry pro praxi včetně doporučení postupu k dosažení co nejlepší kvality povrchu na všech místech povrchu bez rozdílů. Cíle práce, mezi které patřilo zjištění rozdílů v kvalitě obrobeného povrchu mezi jednotlivými typy vzorků a porovnání kvality povrchu jednotlivých stran u vzorků neobrobených a po tepelném zpracování, byly splněny.



## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Markovi Sadílkovi, Ph.D. za obětavost, ochotu a veškeré rady a připomínky při řešení této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat všem zaměstnancům Protokolab, dílen a laboratoří nejen za zhotovení, obrobení a nasnímání vzorků, ale také za poskytnutí cenných informací o postupech a metodách.

Diplomová byla vypracována za podpory projektu: „Specifický výzkum inovativních technologií výroby“, reg. č. „SP2020/27“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

## Seznam použité literatury

1. Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM) - Konstrukter.cz. *Konstrukter.cz - CAD/CAM, 3D tisk a konstruování výrobků* [online]. Brno: Vydavatelství Nová média, 23. 11. 2016, **2016**, 1 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
2. DUŠEK, Lukáš. *Mechanické testování vzorků z oceli 316L po 3D tisku metodou SLM* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2020-01-09]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117432/DUS0031\\_FS\\_N2301\\_2303T002\\_20\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117432/DUS0031_FS_N2301_2303T002_20_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Vedoucí práce Pagáč Marek.
3. KRÓL, Mariusz a Tomasz TAŃSKI. Surface Quality Research for Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V Alloy. *Archives of Metallurgy and Materials* [online]. KRAKÓW: Institute of Metallurgy and Materials Science of Polish Academy of Sciences ; Committee on Metallurgy of Polish Academy of Sciences, 2016, **2016**(3), 6 [cit. 2020-01-10]. DOI: 10.1515 / amm-2016-0213. ISSN 1733-3490. Dostupné z: <https://search.proquest.com/openview/bc437bb8501cde718969087c4573df68/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026345>
4. METELKOVÁ, Jitka. *Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=86460](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86460). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.
5. NOVÁK, Zdeněk. Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 22.11.2011, **2011**(11) [cit. 2020-02-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-kvality-hodnoceni-textury-povrchu.html>
6. ZYGO CORPORATION. *Mx<sup>TM</sup> Surface Texture Parameters* [online]. Middlefield, c2018, 28 s. [cit. 2020-02-23]. OMP-0608C. Dostupné z: <https://www.zygo.com/library/papers/Mx-Surface-Texture-Parameters.pdf>

7. RENISHAW plc. *SS 316L-0407 powder for additive manufacturing: Data sheet* [online]. Stone Staffordshire, c2017, 2 s. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/en/download/data-sheet-ss-316l-0407-powder-for-additive-manufacturing--90802>
8. SINGH, Rupinder a J. Paulo DAVIM, ed. *Additive Manufacturing: Applications and Innovations* [online]. Boca Raton: CRC Press, 2018 [cit. 2020-03-22]. ISBN 9781315168678. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=OGhuDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=OGhuDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
9. SKULINA, Daniel. *Zpracování Al-Sc hliníkové slitiny technologií SLM* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=149770](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149770). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Daniel Koutný.
10. KOVÁŘ, Jiří. Ovlivnění kvality a jakosti obrobené plochy při frézování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2004, 14.04.2004, **2004**(4) [cit. 2020-02-17]. ISSN 1212-2572. 040479. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ovlivneni-kvality-a-jakosti-obrobene-plochy-pri-frezovani.htm>
11. ČIRČOVÁ, Eva a Peter IŽOL. OBROBENÝ POVRCH PO REZANÍ JEDNO A VIAC KLINOVÝM NÁSTROJOM. In: *Transfer inovácií* [online]. Košice, 2008, s. 136-139 [cit. 2020-02-15]. ISSN 1337 - 7094. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/11-2008/pdf/136-139.pdf>
12. Rozvoj a současná úloha aditivní výroby. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2016, 16.11.2016, **2016**(11) [cit. 2020-04-08]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-a-soucasna-uloha-aditivni-vyroby.html>
13. Pokrok v měření a hodnocení struktury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2004, 16.06.2004, **2004**(6) [cit. 2020-04-08]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrok-v-mereni-a-hodnoceni-struktury-povrchu-2.html>

14. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I: elektroerozivní, elektrochemické a chemické obrábění*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3943-1.
15. Drsnost obrobeného povrchu. *Technologie strojního obrábění kovů a broušení nástrojů* [online]. TumliKOVO, c2010, Březen 24th, 2011 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>
16. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-709-9430-4.
17. DOKOUPIL, Filip. *Zpracování slitiny 2618 pomocí technologie selective laser melting* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30309498.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Paloušek.
18. BLANAROVIČ, Lukáš. *Snižování drsnosti povrchu při frézování tvarových ploch* [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129360/BLA0169\\_FS\\_N2301\\_2303T002\\_2018.pdf?sequence=1](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129360/BLA0169_FS_N2301_2303T002_2018.pdf?sequence=1). Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Vedoucí práce Marek Sadílek.
19. Profile roughness parameters - Surface Metrology Guide - Digital Surf. *Surface Metrology Guide - Digital Surf* [online]. Besançon, c2006-2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-profile-parameters.html>
20. YAP, C. Y., C. K. CHUA, Z. L. DONG, Z. H. LIU, D. Q. ZHANG, L. E. LOH a S. L. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews* [online]. 2015, 2(4) [cit. 2020-05-10]. DOI: 10.1063/1.4935926. ISSN 1931-9401. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/286497734\\_Review\\_of\\_selective\\_laser\\_melting\\_Materials\\_and\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/286497734_Review_of_selective_laser_melting_Materials_and_applications)

21. Sz (Maximum Height) | Area Roughness Parameters | Introduction To Roughness | KEYENCE America. *Introduction To Roughness* | KEYENCE America [online]. Itasca: KEYENCE CORPORATION OF AMERICA, c2020 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/sz-maximum-height.jsp>
22. 1p341-1000-xa 1630. *Sandvik Coromant - manufacturing tools & machining solutions* [online]. Sandviken: Sandvik Coromant [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/engb/products/pages/productdetails.aspx?c=1p341-1000-xa%20%20%20%20%20%20%20%20201630>
23. GEBHARDT, Andreas, Jan - Steffen HÖTTER a Dawid ZIEBURA. Impact of SLM build parameters on the surface quality. *RTejournal: Forum für Rapid Technologie* [online]. Aachen, **2014**(11) [cit. 2020-02-11]. Dostupné z: <https://www.rtejournal.de/ausgabe11/3852>
24. VRONKA, Jan. *Porovnání profilových a plošných parametrů povrchu materiálu vytvořeného technologií soustružení* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: [http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117303/VRO0016\\_FS\\_B2341\\_2303R002\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117303/VRO0016_FS_B2341_2303R002_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Vedoucí práce Lenka Čepová.
25. LEACH, Richard, ed. *Characterisation of Areal Surface Texture* [online]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013 [cit. 2020-03-07]. DOI: 10.1007/978-3-642-36458-7. ISBN 978-3-642-36458-7. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=WVdBAAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbp\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=WVdBAAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbp_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
26. Komplexní hodnocení jakosti povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 13.05.2014, **2014**(5) [cit. 2020-04-02]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/komplexni-hodnoceni-jakosti-povrchu.html>

27. TOMAN, Ladislav. *Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=191875](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=191875). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.

## Seznam příloh

Příloha A	Výrobní výkres: Vzorek plný
Příloha B	Výpočtový sešit: Naměřené hodnoty
Příloha C	Soubor fotografií: Fotografie z experimentu